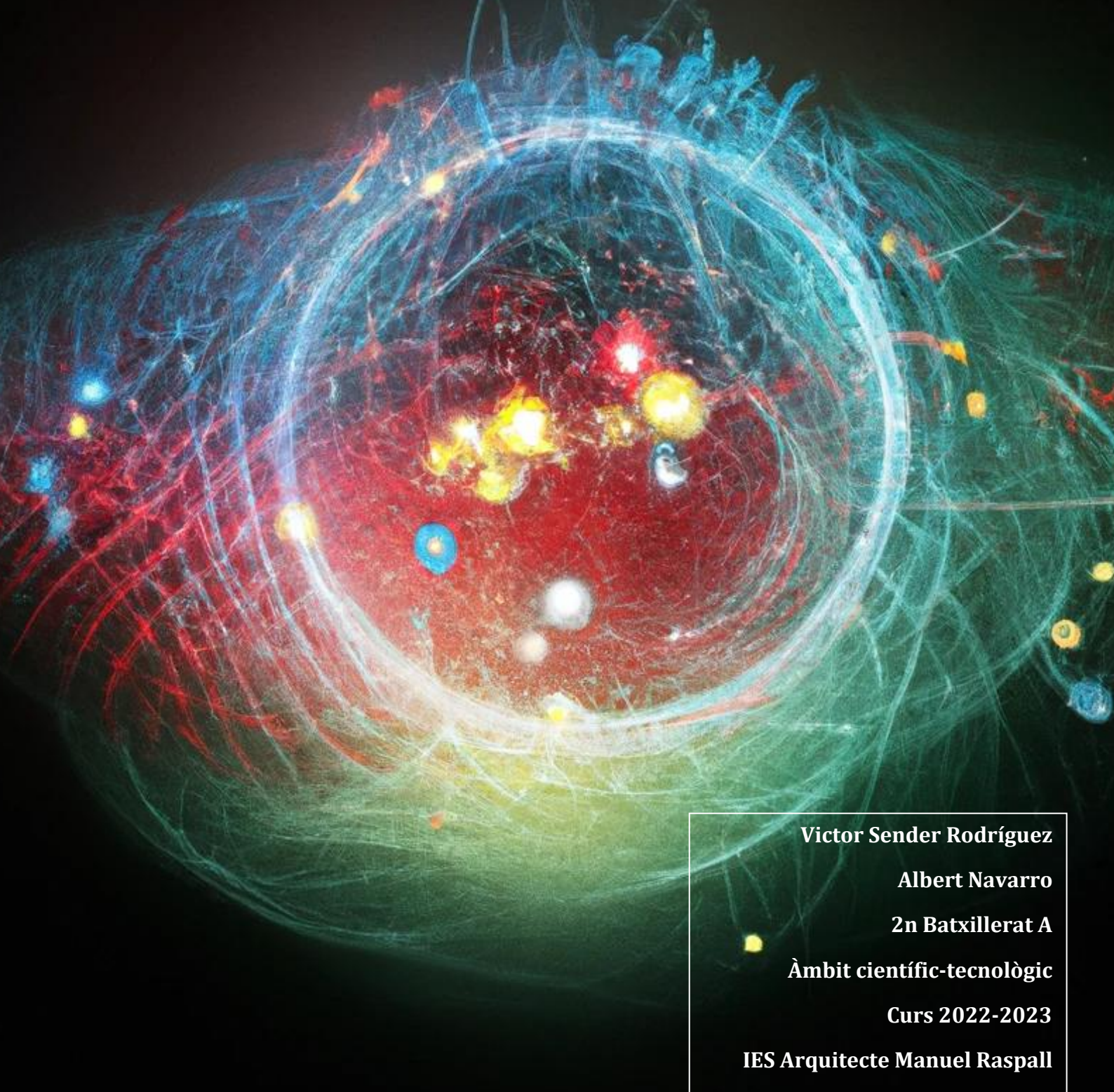


LES PARTÍCULES FONAMENTALS I LA RADIACIÓ



Victor Sender Rodríguez

Albert Navarro

2n Batxillerat A

Àmbit científic-tecnològic

Curs 2022-2023

IES Arquitecte Manuel Raspall

AGRAÏMENTS

M'agradaria transmetre el meu més sincer agraïment cap al meu tutor, l'Albert Navarro, qui m'ha acompanyat durant tot el procés. Gràcies de tot cor per ajudar-me durant tot el treball, per aconsellar-me i per treballar durant hores per tal que la part experimental i els instruments que s'empren fossin òptims per la varietat de procediments. Has estat una peça fonamental i res no hagués estat possible sense la teva ajuda.

Gràcies també a la UB per proporcionar el material i la informació per a dur a terme la cambra de boira del marc experimental, però específicament al professor Joan Esteve per estar pendent de mi. Per acabar donar les gràcies a la meva família, el pilar més important que m'ha donat suport sempre que ha estat escaient.

ABSTRACT

Desde principios del siglo XX con la revolución de la física cuántica y nuclear, el mundo subatómico ha sido objeto de estudio de muchos físicos alrededor del mundo. El objetivo de este artículo es de sintetizar el estado de la ciencia de la física de partículas, explicar sus respectivos descubrimientos así como la radiación que estas emiten.

Las partículas pueden ser estudiadas, contadas y observadas. Es por esa razón que, en la parte experimental, haciendo uso de diversos métodos e instrumentos de medida asequibles, se ha analizado la radioactividad que emana de diversos emisores radioactivos de fácil acceso, con la intención de estudiar los fenómenos que la caracterizan y la realidad cotidiana de esta. Además, esa misma radiación puede ser observada mediante una cámara de niebla, cuya construcción de naturaleza casera se detalla y se aplica en el estudio.

Palabras clave: Física de partículas, radioactividad, física nuclear, detector Geiger, cámara de niebla, partículas subatómicas.

Since the early s.XX with the revolution of quantum and nuclear physics, the subatomic world has been a subject matter of many physicists from around the world. The goal of this article is to summarize the state of particle pyhsics science, explain the respective discoveries, as well as the radiation they emit.

Particles can be studied, counted and observated. Therefore, in the experimental part, making use of diverse methods and affordable measure instruments (Geiger detector) it has been analised the different radioactivity that emanate from radiation emitters, intending to study the phenomenons that characterizes it and its everyday nature. Furthermore, that radiation can be observed with a cloud chamber, whose homemade construction is detailed and applied in the research.

Keywords: Particle physics, radioactivity, nuclear physics, Geiger Detector, cloud chamber, subatomic particles.

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ.....	8
1.1. Motiu de la tria.....	8
1.2. Objectius i hipòtesi.....	8
1.3. Metodologia i estructura del treball	8
2. MARC TEÒRIC	9
2.1. L'àtom.....	9
2.2. El Model Estàndard	10
2.3. La matèria.....	10
2.4. L'antimatèria	11
2.5. Les forces fonamentals	12
2.6. Classificació segons el model estàndard i història de les partícules	13
2.6.1. Els quarks:	13
2.6.2. Els leptons:	17
2.6.3. Els bosons:.....	22
2.7. Radioactivitat i estabilitat nuclear.....	24
2.8. Radioactivitat natural i artificial	27
2.9. Defecte de massa	27
2.10. Decaïment radioactiu	28
2.11. Sistemes de detecció de partícules.....	29
2.11.1. Cambra de boira.....	29
2.11.2. Detector Geiger	30
2.11.3. Detector de partícules alfa.....	30
3. MARC PRÀCTIC	31
3.1. Visualització de partícules amb una cambra de boira:	32
3.1.1. Parts i materials.....	32
3.1.2. Procediment.....	33
3.1.3. Resultats i conclusions	34
3.2. Experimentació amb el detector Geiger i el detector alfa:	35
3.2.1. Càlcul estadístic de la radiació de fons:	35
3.2.2. Blindatge de mostres radioactives:	37
3.2.3. Càlcul del temps mort dels detectors de partícules:.....	41
3.2.3.Determinació de la radiació ocasionada pel radó present a les cases:.....	43
3.2.4. Experiment amb KCl:	46
4. CONCLUSIONS	50
5. REFERÈNCIES	52
6. ANNEX	

6.1. Distribució de Poisson de la radiació de fons.....	3
6.2. Taula de dades de la intensitat del detector de fums.....	3
6.3. Taula de dades de la intensitat del penjoll de tori.....	4
6.4. Taula de dades de la manta de tori.....	4
6.5. Taula de dades del càlcul del temps mort del Detector Geiger	5
6.6. Taula de dades del càlcul del temps mort del Detector Alfa	5
6.7. Taula de dades del càlcul del temps mort del Detector Model	6
6.8. Mesures dels CPM del radó ocasionat a diferents parts de l'habitatge	7
6.9. Primera experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense.....	8
6.10. Segona experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense.....	8
6.11. Tercera experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense	9
6.12. Programa Arduino emprat en el marc pràctic	9
6.13. La pseudociència: un perill amagat.....	10
6.14. Construcció d'una cambra de boira alternativa.....	11

ÍNDEX DE FIGURES

Figura 1. Les tres generacions de partícules fonamentals	10
Figura 2. Descobriment del positró.....	12
Figura 3. Els quarks s'agrupen en parelles dins les generacions.....	13
Figura 4. Experiment al SLAC on es descobrí l'existència dels quarks	15
Figura 5. El tau sempre es desintegra en leptons de les dues primeres generacions	19
Figura 6. El decaïment beta on l'àtom emet un electró i un antineutrí electrònic.....	21
Figura 7. Plànols originals de l'experiment al laboratori Brookhaven on les dues línies rectes representen el feix de pions i neutrons.....	22
Figura 8. Plànols de l'experiment al Fermilab que descobrí el neutrí tau	22
Figura 9. Tipus de decaïment en funció de la relació neutrons-protons	24
Figura 10. Detector de fums que conté americi-241, un emissor de partícules α	25
Figura 11. Manta de càmping gas antiga que conté tori, emissor de partícules α i β	25
Figura 12. Nivells de penetració de les radiacions ionitzants	26
Figura 13. Els nuclis es desintegren seguint un decaïment exponencial	28
Figura 14. Funcionament d'una cambra de boira amb un circuit tancat d'alcohol	29
Figura 15. Detector Geiger comercial	30
Figura 16. BPW34 modificat.....	31
Figura 17. BPW34 original	31
Figura 18. Detector α emprat en la part pràctica	31
Figura 19. Muntatge de la cambra de boira amb nitrogen líquid	33
Figura 20. El penjoll de tori a l'interior de la cambra de boira amb gel sec.....	33
Figura 21. Les trajectòries dels electrons amb alta energia són rectilínies	34
Figura 22. Traces dels e- emesos pel penjoll de tori	34
Figura 23. El model de Comptador Geiger emprat en les experiències.....	35

Figura 24. Muntatge experimental del blindatge d'alumini	38
Figura 25. Esquema gràfic del mètode de les dues fonts	42
Figura 26. Detector Geiger comercial de la marca GQ Electronics, model GMC-500+ mesurant la radiació d'una font	43
Figura 27. Muntatge experimental per la detecció del radó	44
Figura 28. Diferents maneres de infiltració del radó a les cases.....	46
Figura 29. Muntatge experimental de l'experiment amb KCL	47
Figura 30. Esquema de decaïment del ^{40}K	47

ANNEX:

Figura 1. Penjoll de tori emprat en la part pràctica	10
Figura 2. Descripció d'una suposada "energia quàntica" dels venedors del penjoll de la figura que promet efectes curatius.	10
Figura 3. Cèl·lula Peltier.....	11
Figura 4. Muntatge de les capes del sistema de refredament.....	12
Figura 5. Connexió del sistema de refredament al corrent mitjançant una bateria d'un ordinador de torre.....	13
Figura 6. Correccions implementades posteriorment	13

ÍNDEX DE TAULES

Taula 1. CPM de la radiació de fons	36
Taula 2. Valor mig de les dades experimentals de la intensitat del detector de fums	39
Taula 3. Valor mig de les dades experimentals de la intensitat del penjoll de tori	39
Taula 4. Valor mig de les dades experimentals de la intensitat de la manta de tori	39
Taula 5. Coeficients lineals d'atenuació de l'alumini obtingut amb les dades del collar de tori	40
Taula 6. Coeficients lineals d'atenuació de l'alumini obtingut amb les dades de la manta.....	40
Taula 7. Mitjana de les dades de les tres mesures diferents pel càlcul del temps mort del Detector Geiger	42
Taula 8. Mitjana de les dades de les tres mesures diferents pel càlcul del temps mort del Detector Alfa	42
Taula 9. Dades de les tres mesures diferents pel càlcul del temps mort del Geiger Model.....	43
Taula 10. Mitjana dels CPM del radó ocasionat a diferents parts de l'habitatge	45
Taula 11. Mitjana de la primera experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense.....	48
Taula 12. Mitjana de la segona experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense.....	49
Taula 13. Mitjana de la tercera experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense.....	49
Taula 14. Comparació de les 3 experiències del decaïment del ^{40}K	49

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Motiu de la tria

Des de petit, sempre m'ha interessat tot el relacionat amb la física. És un món intrigant i ple de misteris que em fascina cada cop que apreng alguna cosa nova. Però dins d'aquesta ciència tan immensa, el que realment m'apassiona d'aquest món és la física quàntica i la física de partícules. Les partícules fonamentals, les interaccions i les forces del món quàntic són la raó per la qual vaig triar aquest tema, en part motivat també per la lectura de llibres com *La porta dels tres panys* de Sònia Fernández-Vidal o la visualització de canals com *Quantum Fracture*.

1.2. Objectius i hipòtesi

El meu treball de recerca té la intenció de donar a conèixer el món de la física de partícules i la seva història així com les radiacions ionitzants que ens envolten. Per aquesta raó, quant al marc teòric, em proposo assimilar, sintetitzar i explicar els conceptes bàsics així com tota la teoria que s'exposa, amb l'objectiu d'aprendre a fer recerca d'informació mitjançant llibres, Internet o "papers" sent capaç de ser crític amb allò que he cercat. En relació amb el marc pràctic, el meu propòsit és construir un aparell de detecció de partícules (Geiger) i programar-lo mitjançant Arduino o altres programes per comptar-les i analitzar-les. A més, tinc la intenció de dissenyar i fabricar una cambra de boira per la seva posterior utilització en la visualització de partícules.

1.3. Metodologia i estructura del treball

Per la realització del treball, creia oportuna des d'un principi la recerca d'informació per assimilar, no només els conceptes bàsics, sinó la teoria implicada que resultava de complexa comprensió. Per dur a terme aquesta tasca, he llegit un munt de llibres i d'articles científics, els anomenats "papers" d'investigació, la majoria dels quals escrits en anglès a causa de la poca literatura espanyola relacionada amb el tema. A mesura que llegia i em feia una idea, escrivia un resum per temes i apartats començant en un primer moment per la secció de física de partícules i tota la història que l'envolta, i continuant per la física nuclear on es parla de radiació, desintegracions etc.

Un cop acabada la part teòrica, em vaig disposar a abordar el marc pràctic. Per fer-ho, em vaig posar en contacte amb el professor emèrit de la UB, Joan Esteve, del projecte Forces que m'ajudaria a fer la part pràctica. Aquesta es divideix en dos, la visualització de partícules en una cambra de boira, en la qual he rebut l'ajuda del programa, i l'experimentació amb detectors de partícules ionitzants amb el Geiger i el detector alfa construït pel meu tutor del TR que funcionen amb programació Arduino. L'ús dels detectors tindrà la finalitat de dur a terme diverses experiències, analitzant la radiació ionitzant de diversos elements i experimentant amb les característiques d'aquestes.

2. MARC TEÒRIC

2.1. L'àtom

Tothom s'ha qüestionat en algun moment de què estem formats els humans. Els biòlegs proposen que estem formats de cèl·lules, els químics argumentarien, en canvi, que som una combinació d'elements: oxigen, carboni, nitrogen, etc..

I entre tanta discussió apareixen els físics. Aquests porten més d'un segle intentant desxifrar què ens constitueix. Partiren d'una primera hipòtesi fa més de dos mil anys per part del grec Demòcrit (400 aC-370 aC) que proposava la denominada Teoria Atòmica de l'Univers. Aquesta presentava l'àtom¹, la partícula elemental que formava tot. Molts segles després, però, descobriren que dins l'àtom hi havia tres partícules diferents: els protons, electrons i neutrons, i que a més dues d'aquestes, el protó i el neutró, tampoc eren fonamentals, sinó que alhora estaven formades per altres partícules més petites encara, els quarks.

Actualment, s'han detectat centenars de partícules subatòmiques diferents mitjançant els acceleradors de partícules d'altres energies, dispositius que estudien aquestes partícules fent-les col·lidir.

¹ El seu nom prové del grec *ἄτομος* 'que significa indivisible

Cadascuna de les partícules que s'originen en el xoc es registren amb ajuda de detectors especialitzats. Aquestes partícules, però, no sempre són elementals i sempre estan conformades per tres tipus de partícules:

ELS QUARKS

ELS LEPTONS

ELS BOSONS

2.2. El Model Estàndard

El Model Estàndard és una teoria desenvolupada entre el 1970 i 1973 que busca la simplicitat i unificació de la física de partícules i explica els centenars de partícules i les seves interaccions.

Aquest model defineix que tot el que ens envolta està fet de petits blocs anomenats partícules elementals —que es divideixen en els tres grans grups vists anteriorment— i totes aquestes es regeixen sota 4 forces fonamentals (força nuclear forta, nuclear dèbil, electromagnètica i gravitatòria). Ha predit un gran nombre de fenòmens, de partícules i d'interaccions així com explicat els resultats experimentals obtinguts als diferents centres d'investigació i recerca moderns. Aquesta teoria, tanmateix, també té alguns inconvenients. Un d'ells, per exemple, és que no aconsegueix acoblar d'alguna manera la força gravitatòria (descrita per la Relativitat General d'Einstein) amb el món quàntic.

2.3. La matèria

	I	II	III
masa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
carga	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
espin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
QUARKS	u up	c charm	t top
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electrón	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
LEPTONES	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electrón neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino

Figura 1. Les tres generacions de partícules fonamentals

La matèria és el que forma tot cos físic; tot allò que ocupa un lloc a l'espai i té una massa és matèria. Tota la matèria es forma amb dos grups de partícules fonamentals, els **leptons** i els **quarks**. Cada tipus engloba 6 partícules i tots dos grups es divideixen per generacions que comparteixen les propietats i càrregues, però difereixen en la massa. Cada generació és més pesada que l'anterior, raó per la qual la primera generació és la més lleugera.

Alhora les partícules de la segona i tercera generació són molt inestables, i es van desintegrar en una fracció de segon després del Big Bang. Tot i això, els físics, poden recrear-les i estudiar-les en els moderns acceleradors de partícules i aquestes sempre decauen en partícules de primera generació. És per això que la matèria estable i visible es forma amb la primera generació. Només cal veure que l'àtom, el que forma la matèria visible, està format per protons i neutrons, formats per quarks up i quarks down i electrons, tots ells partícules de la primera generació.

2.4. L'antimatèria

L'antimatèria és la contrapart de la matèria i tot i que pugui semblar ciència-ficció, existeix. Això confirma d'alguna manera la teoria que afirma l'existència d'una simetria universal on cada element té un oposat. Per aquesta raó, per cada partícula fonamental existeix una antipartícula. Les antipartícules tenen exactament la mateixa massa i actuen igual que les seves anàlogues, però el que les diferencia és que tenen totes les càrregues de signe oposat. Per exemple, mentre que un protó té càrrega positiva, l'antiprotó és elèctricament negatiu.

Per a representar les antipartícules se li sol col·locar una ratlla a sobre el símbol de la partícula. En el cas del protó (p), l'antiprotó s'escriu com $\bar{p}$, però en altres casos com el de l'electró (e^-) l'oposada, que és el positró, se simbolitza amb e^+ .

L'antimatèria es crea naturalment on hi ha col·lisions entre partícules d'alta energia com galàxies, però artificialment, s'ha pogut sintetitzar antihidrogen, el primer cop l'any 1995. Aquest està format per un antiprotó de càrrega negativa i un positró orbitant-lo. La principal característica de l'antimatèria és que, si entra en contacte amb la matèria ordinària, s'aniquilen mútuament i produeixen una gran quantitat d'energia que resulten en altres partícules i antipartícules així com radiació electromagnètica.

Un dels grans misteris de la física de partícules té relació amb l'antimatèria: Si en teoria la matèria i l'antimatèria són exactament idèntiques, per què la distribució de la matèria i l'antimatèria a l'univers no és igual i n'hi ha més matèria que antimatèria? La resposta continua sent una incògnita, però l'estudi de les partícules ha de ser l'encarregat de donar-li resposta.

L'existència d'aquestes antipartícules va ser predita pel físic teòric Paul Dirac l'any

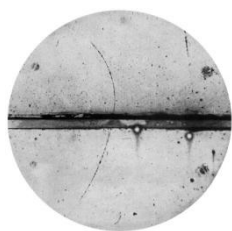


Figura 2. Descobriments del positró

1928 que tenia la intenció d'explicar com actua l'electró a velocitats pròximes a les de la llum (el denominat comportament relativista). Amb la fórmula, per simplificar, sortien dos resultats possibles que tenien el mateix valor però diferent signe. En

conseqüència va teoritzar, una partícula amb igual massa que l'electró i mateix comportament però carregat positivament.

L'existència del que van denominar positró es va comprovar quatre anys més tard quan Carl David Anderson² va fotografiar el rastre dels raigs còsmics amb una cambra de boira.

2.5. Les forces fonamentals

L'univers tal com el coneixem es regeix sobre quatre interaccions fonamentals. Totes les forces³ que coneixem s'atribueixen a una de les quatre sent, per tant, manifestacions d'aquests quatre tipus diferents:

- **Interacció forta:** És l'encarregada de mantenir units als quarks dins del protó i neutró (nucleons) de l'àtom. A més, indirectament mantenen l'àtom unit vencent a la força electromagnètica que repel·leix els protons entre si. És una força de curt abast, ja que només actua en distàncies pròximes als 10^{-14} m, però és molt intensa.
- **Interacció dèbil:** Es responsabilitza de la transformació (o transmutació) d'unes partícules en altres. El seu nom prové del fet que és molt menys intensa que la forta i l'electromagnètica. Aquesta força, per exemple, pot fer que un neutró es converteixi en un protó i emeti radiació, per tant, és la responsable del decaïment i la desintegració de les partícules.
- **Interacció electromagnètica:** És la unificació de la força elèctrica i magnètica que ja coneixem de la física clàssica. S'encarrega de mantenir units àtoms i

² Físic estatunidenc descobridor del positró i del muó per al qual va ser premiat amb el Premi Nobel de Física l'any 1936.

³ Cal diferenciar força i interacció. Les forces són interaccions mentre que les segones també inclouen desintegracions i aniquilacions que pateix una partícula. Sovint els termes s'intercanvien, però és igualment intel·ligible.

molècules gràcies a la força de repulsió o atracció on la càrrega elèctrica té un paper fonamental. És descrita per les lleis de Maxwell.

- **-Interacció gravitatòria:** Descriu com les masses s'atreuen entre si i, per tant, dels moviments dels cossos de l'univers. Fou proposada primerament per Newton i la seva llei de la gravitació universal i més tard Einstein amb la teoria de la relativitat espacial.

2.6. Classificació segons el model estàndard i història de les partícules

2.6.1. Els quarks:

Els quarks⁴ són les partícules fonamentals que constitueixen gairebé tota la matèria. Formen el protó, el neutró i els hadrons. Els quarks són les úniques partícules elementals que interactuen amb les 4 forces elementals. N'hi ha 6 tipus o sabors i tots tenen un antiquark corresponent. Es classifiquen per generacions:

- **Primera generació:** Up (u) i Down (d)
- **Segona generació:** Charm (c) i Strange (s)
- **Tercera generació:** Top (t) i Bottom (b)

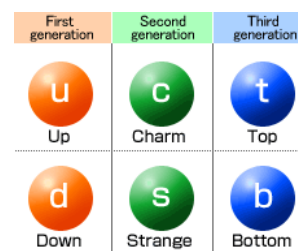


Figura 3. Els quarks s'agrupen en parelles dins les generacions

L'any 1964 ja s'havien descobert una gran quantitat de partícules. El misteri que abastava la comunitat científica era si totes aquestes eren elementals —massa enrevessat per ser possible— o estaven conformades per altres encara més petites. Així és com Muray Gell-Mann⁵ i George Zweig⁶ independentment i de forma simultània van predir l'existència dels quarks. La primera teoria proposava tan sols 3 tipus de quarks: up, down i strange.

⁴ Expressió sense sentit que prové de la novel·la *Finnegan's Wake* de James Joyce: *Three quarks for Muster Mark!*

⁵ Físic estatunidenc guanyador del Nobel que s'interessà en les partícules elementals, contribuint enormement en el Model Estàndard.

⁶ Físic rus que va estudiar física de partícules i més tard s'implicaria en neurobiologia.

La seva existència permetia respondre moltes incògnites en aquell moment i resolia el misteri plantejat anteriorment. Tot i això, la idea va ser descartada per la seva radicalitat, però quin era el motiu? Doncs la resposta té relació amb una propietat peculiar dels quarks: el confinament. Aquesta propietat descriu que els quarks estan permanentment atrapats dins de les partícules que formen i no es poden separar individualment per estudiar-los.

Els quarks, per tant, no existeixen sols, un símil clar seria el de l'oxigen a l'aire. L'oxigen monoatòmic no existeix a la naturalesa individualment, sempre l'observem per parelles en forma d'O₂. La diferència és que els quarks de cap manera es poden separar artificialment, en contrast amb l'oxigen que sí que ho fa. Aquesta propietat és l'anomenat confinament, l'esbojarrada proposta (en el context científic) de Gell-Mann que no era tan desenraonada. Així doncs, els quarks s'ajunten i formen hadrons i depenent si són dos o tres quarks s'anomenen mesons o barions respectivament:

- Els **mesons**⁷ són partícules subatòmiques que estan formades per un quark i un antiquark. Per aquesta raó, són inestables i tenen una vida molt curta. Un exemple és el pió (π^+) compost per un quark up i un antiquark down. En un principi es creia que eren els encarregats de mantenir unit l'àtom, però més tard es va demostrar que no era així.
- Els **barions**⁸ també són partícules fonamentals, però es formen amb la unió de 3 quarks. El protó i el neutró són els exemples més reconeguts; el primer es forma amb dos quarks up i un quark down (uud) mentre que el segon són dos quarks down i un quark up (udd).

Els mesons i els barions pertanyen a la família dels hadrons, partícules subatòmiques que experimenten la força nuclear forta.

Però quina és la història dels quarks?

⁷ Del grec antic μέσος (mésos) = que està en mig. En un principi, es creia que els mesons eren els portadors de la força nuclear forta (avui en dia sabem que són els gluons) que uneix el protó i el neutró, d'aquí el seu nom.

⁸ Del grec βαρύς, barys, "pesat"

1. EL QUARK UP I DOWN (u i d)

La **primera generació** de quarks, el quark up i down, va ser descoberta l'any 1967, tres anys després de la seva predicció. Es va descobrir a l'SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) amb una sèrie d'experiments que se servien d'un procés similar al que havia emprat Rutherford per descobrir el nucli atòmic.

L'experiment es basava en el moment magnètic del neutró. Sempre se'ns ha dit que el neutró no té càrrega elèctrica, però, en realitat, no té càrrega elèctrica total. És a dir, es va teoritzar que estava format per partícules més petites (els quarks) les quals tindrien càrregues elèctriques que sumades donarien 0.

Per comprovar-ho els investigadors de l'SLAC necessitaven una partícula petita, fàcil de produir i que no interactués amb la interacció forta del nucli sinó amb les càrregues elèctriques per penetrar l'àtom i esbrinar què hi havia a l'interior dels barions. Per això, van decidir



Figura 4. Experiment al SLAC on es descobrí l'existència dels quarks

disparar electrons al nucli atòmic, els quals van ser dispersats per neutrons i protons i van demostrar l'existència de les partícules que els conformaven, el quark up i el quark down.

2. EL QUARK STRANGE (s)

La **segona generació de quarks** (quarks charm i strange) tenen una història diferent.

Aquest quark va ser predit inicialment amb el quark up i el down sent proposat com a explicació de l'enorme varietat de partícules que no podien existir amb combinacions dels altres dos quarks.

Algunes d'aquestes partícules eren el Kaó (K) i la lambda (Λ), i totes dues tenien una propietat comuna: vivien durant un temps molt més llarg del que s'esperava (10^{-10} segons en lloc dels 10^{-23} segons esperats). Això era degut al fet que estaven formades pel quark strange que els hi atorgava aquesta característica. El nom del quark prové alhora d'aquesta propietat que van batejar "estranyesa"—ja que les partícules vivien durant un temps "estranyament" llarg— abans inclús del descobriment del quark.

3. EL QUARK CHARM (c)

Per altra banda, el quark charm va ser postulat en un principi de manera innecessària. El model de tres quarks explicava totes les partícules en aquell moment descobertes. Així doncs, no hi havia cap raó aparent per pensar que hi havia una altra que faltava, bé, una sí; en aquell moment s'havien descobert 4 leptons⁹ i, per tant, es va pensar que els quarks havien de seguir aquesta simetria. Per aquesta raó (i d'altres com un temps de vida anòmal) el físic americà Sheldon Glashow¹⁰, el grec John Iliopoulos¹¹ i l'italià Luciano Maiani¹² van crear una teoria l'any 1970 que predeia l'existència del quart quark, el quark charm. Anys més tard, el 1974, a dos centres d'investigació diferents, l'SLAC i el Laboratori Nacional de Brookhaven es va detectar una mateixa partícula anomenada J/ψ o encantonio (charmonium en castellà) la primera que contenia un quark i un antiquark charm.

4. EL QUARK BOTTOM (b)

La **tercera generació de quarks** van ser batejats en un principi com a "truth" i "beauty" (veritat i bellesa) però més tard van passar a anomenar-se com els coneixem ara; top i bottom. En aquest cas, el seu descobriment no va ser del tot sorprenent, ja que anys abans s'havia descobert un tercer leptó, el tau, i ja es creia que havia d'haver-hi una tercera generació de quarks complint la simetria que feia anys ja havia predit el descobriment del quark charm.

El quark bottom va ser descobert, a diferència dels seus "germans", al Fermilab¹³ per una col·laboració dirigida pel físic Leon Lederman¹⁴. Es va trobar amb una tècnica experimental similar a la realitzada amb el descobriment del quark charm. Aquest

⁹ Vegeu a secció 2.6.2

¹⁰ Físic teòric estatunidenc conegut per proposar (juntament amb altres físics) la teoria electrodèbil, teoria que unifica la força electromagnètica i la nuclear dèbil en una que li va valdre el premi Nobel l'any 1979.

¹¹ Físic teòric grec conegut per ser el primer a presentar el Model Estàndard.

¹² Físic italià (co) autor de més de 200 publicacions científiques sobre física de partícules, interaccions, hadrons i quarks.

¹³ El Fermilab (Laboratori Nacional Fermi) és un laboratori de física d'altres energies, dit així en honor al físic Enrico Fermi, pioner en física de partícules.

¹⁴ Físic experimental d'altres energies i Premi Nobel de Física l'any 1988 pel descobriment del neutrí muònic. (Vegeu a secció 2.6.2)

consistia bombardejar un blanc fix de beril·li amb un feix de protons i detectar les noves partícules als estats finals. Aquestes noves partícules eren mesons i es van designar amb el nom d'Upsilon (Υ) i estaven formades per una parella quark-antiquark bottom.

5. EL QUARK TOP (t)

Després del descobriment del quark bottom les expectacions no van trigar a arribar pel sisè i en teoria últim quark. Però el temps passava i no es detectava aquest quark. Van passar més de vint anys perquè el mateix laboratori que havia evidenciat l'existència del seu parell el descobrí. La seva gran massa- el seu pes és equivalent aproximadament a un àtom d'or- fou el principal motiu pel temps d'espera, ja que es necessitava una gran quantitat d'energia per crear-lo mitjançant un col·lisionador de protons i antiprotons.

La seva troballa va ser directa a diferència dels dos quarks anteriors. Les col·lisions protó-antiprotó a molta alta energia produïen estats finals que eren estudiats i gràcies a estimacions i aproximacions d'on es materialitzaria el quark top, van poder mesurar la seva massa, que coincidia amb les prediccions prèvies.

2.6.2. Els leptons:

Els leptons¹⁵ juntament amb els quarks formen la matèria ordinària. A diferència dels quarks, els leptons són partícules independents i no creen altres partícules compostes. A més, no interaccionen amb la força nuclear forta (la que manté els àtoms units). Existeixen 6 leptons i les seves corresponents antipartícules i també es classifiquen per generacions:

- **Primera generació:** Electrón (e^-) i neutrí electrònic (ν_e)
- **Segona generació:** Muó (μ^-) i neutrí muònic (ν_μ)

¹⁵ Leptó (del grec leptos) fou usat per primer cop pel físic León Rosenfield l'any 1948: *Seguint el suggeriment del Prof. C. Møller, Jo vaig adoptar - com una derivació de "nucleó" - la denominació "leptó" (de λεπτός, petit, prim, lleuger) per a designar una partícula de petita massa.* El nom fou originat abans que es descobrí el tau, l'últim leptó que té una massa el doble de gran que el protó.

➤ **Tercera generació:** Tau (τ^-) i neutrí tauònic (ν_τ)

Per tant, cada generació està formada pel que es coneix com “doblet dèbil” que són els 3 tipus de leptons i el neutrí corresponent. La massa varia segons les generacions sent el tau la partícula leptònica més gran (més de 3000 vegades la massa de l'electró) i el muó la segona més massiva.

1. L'ELECTRÓ (e^-)

L'electró és probablement una de les partícules elementals més conegudes. És el responsable primordial de la química i de les interaccions entre àtoms. Alhora és el responsable del corrent elèctric i consegüentment de l'energia elèctrica que utilitzo per escriure aquest TR.

L'electró va ser la primera partícula elemental descoberta. La idea de l'electró sorgeix ja a principis del segle XIX on Richard Laming¹⁶ postula un nucli envoltat de capes concèntriques de partícules elèctriques. Posteriorment, G. Johnstone Stoney¹⁷ l'any 1874 també va proposar que havia d'existir una partícula com a unitat de càrrega fonamental que anys més tard (1891) anomenaria electró. Però no va ser fins a l'any 1905 que l'electró fou descobert per Joseph John Thomson¹⁸ i els seus col·legues al Laboratori Cavendish de la Universitat de Cambridge.

J.J. Thomson estava estudiant els raigs catòdics, fluxos d'electrons observats en tubs al buit. A aquest tub buit se li aplica un voltatge als dos elèctrodes (l'ànode i el càtode), que produeix una llum en el vidre oposat a l'elèctrode negatiu. El raig és emès pel càtode i es va veure que es podia desviar per camps elèctrics o magnètics. Thompson va pensar que els rajos estaven formats per corpuscles, els electrons, la naturalesa dels quals era independent a la del gas dins del tub, i precisament aquesta independència va agafar rellevància quan va deduir que els electrons eren, per tant, components fonamentals d'un àtom.

¹⁶ Cirurgià, inventor, químic i filòsof britànic que es va interessar per la teoria de l'electricitat, i entre 1838 i 1851 va publicar una sèrie d'articles en els quals especulava sobre la composició dels àtoms.

¹⁷ Físic irlandès que publicà més de 50 escrits científics fent importants contribucions a la física còsmica i la teoria dels gasos.

¹⁸ Professor universitari i físic anglès, guardonat amb el Premi Nobel de Física pel descobriment de l'electró. Formulà la teoria atòmica de Thomson anomenada també el model del pastís de panses.

A més, com que les partícules s'emetien pel càtode elèctricament negatiu i eren repel·lides pel pol negatiu d'un camp elèctric es va deduir que aquestes partícules tenien una càrrega negativa neta.

2. EL MUÓ (μ^-)

El muó és la segona partícula leptònica i és 200 vegades més gran que l'electró. Té una vida relativament més llarga que altres partícules inestables uns 2.2 μ s. El seu descobriment és diferenciador, ja que és la primera partícula descoberta que no formava part de l'àtom. D'això se'n adonà Carl D. Anderson l'any 1936. Aquest estava estudiant la radiació còsmica i va veure que hi havia partícules que en aplicar-s'hi un camp electromagnètic es desviaven de manera diferent a la qual es desviava l'electró quant a la curvatura. És a dir, tot i que va poder comprovar que es corbava cap al mateix sentit que l'electró i que, per tant, la partícula estudiada era negativa, no ho feia amb el mateix angle sinó amb una curvatura intermèdia entre l'electró i el protó. És per aquesta raó que en un principi la van anomenar mesotró (del grec mesos, mitjà/entremig) a més de per la seva massa mitjana. El problema és que anys més tard va aparèixer el concepte dels mesons i per tal de no confondre's, se'l va anomenar μ -mesó que més tard es va quedar en muó (μ).

3. EL TAU (τ^-)

El tau (τ) fou l'últim leptó en ser descobert. És el més massiu i el més inestable, el que provoca que tingui una vida mitjana molt curta, és a dir es desintegra amb molta facilitat en un neutrí tau, un muó i un antineutrí muònic o un electró i un antineutrí electrònic.

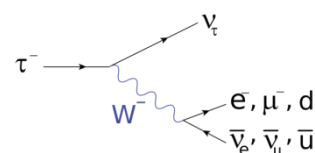


Figura 5. El tau sempre es desintegra en leptons de les dues primeres generacions

La seva història és similar a les altres partícules. El tau fou descobert al SLAC, més en concret al SPEAR¹⁹, amb Martin Lewis Perl²⁰ al capdavant durant una sèrie d'experiments que es van dur a terme entre els anys 1974 i 1977. El descobriment va

¹⁹ Sigles de Stanford Positron Electron Asymmetric Rings, un accelerador que feia xocar electrons contra protons.

²⁰ Físic i professor universitari nord-americà guardonat amb el Premi Nobel de Física l'any 1995 per haver descobert el leptó tau.

ser conseqüència d'una anomalia en la desintegració de les partícules. Quan es feien col·lidir un electró i un positró el que es detectava eren diverses partícules conegudes que, sumades, no donaven l'energia de l'estat inicial. És per això que, es va teoritzar una partícula més massiva que es desintegraria en les partícules que detectaven, el tau. Va tardar a descobrir-se, ja que després del xoc electró-positró es creava un parell tau-antitau, el que requeria molta energia per produir-se i les màquines fins aquell moment no tenien suficient potència.

4. ELS NEUTRINS

Els neutrins no tenen càrrega i tenen una massa tan negligible que en un principi, es va pensar que no tenien massa com el fotó, ja que també viatgen a velocitats pròximes a les de la llum. La seva massa i el fet que només es vegin afectats per la força nuclear dèbil i la gravitatòria fa que gairebé no interaccioni amb la matèria. Així i tot, això no significa que no hi hagi. De fet, cada segon que passa el teu cos rep 10^{14} neutrins provinents del Sol. Els tres tipus de neutrins es diferencien per la manera amb la qual interaccionen i es van teoritzar l'any 1930.

4.1. NEUTRÍ ELECTRÒNIC (ν_e)

L'encarregat de proposar-lo fou Wolfgang Pauli²¹ que va donar una proposta al problema de la desintegració beta. En un principi, es creia que una desintegració beta (desintegració nuclear radioactiva on s'emet una partícula beta, un electró o un positró i el neutrí associat) només emetia un electró.

La disjuntiva era que el retrocés del nucli no tenia el sentit oposat al de l'emissió de l'electró i que, a més, els electrons no eren emesos amb tota l'energia que "desprenia" el nucli, sinó amb menys. L'única explicació que van saber donar-li era que hi havia una altra partícula que s'emetia juntament amb l'electró, però havia de tenir una ínfima, inclús nul·la, massa i càrrega, ja que no es detectava cap rastre d'aquesta. Això resolvia tant el problema de la conservació del moment com el de l'energia.

²¹ Físic teòric austríac-suís, guanyador del Premi Nobel de Física pel seu descobriment del "Principi d'Exclusió de Pauli". Els seus experiments van portar al desenvolupament dels primers conceptes de la física quàntica i va ser el primer investigador a reconèixer el neutrí com una partícula real.

Per aquesta raó, Enrico Fermi va donar suport als neutrins²², com va anomenar ell, de

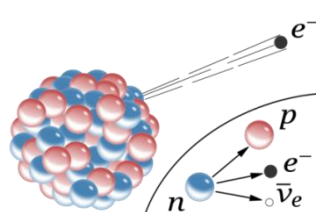


Figura 6. El decaïment beta on l'àtom emet un electró i un antineutrí electrònic

Pauli, desenvolupant la teoria de decaïment beta actual on un parell d'electró-neutrí és produït espontàniament per un nucli de la mateixa manera que els fotons són emesos pels àtoms excitats. Això es va comprovar experimentalment

l'any 1956 per Frederick Reines²³ i Clyde Cowan²⁴ quan detectaven els antineutrins electrònics emesos pel reactor nuclear Savannah River.

4.2. NEUTRÍ MUÒNIC (ν_μ)

En el cas del segon neutrí, el muònic, es va evidenciar al Brookhaven National Laboratory l'any 1962 amb 3 científics principals: Leon Lederman (el descobridor del quark bottom) Jack Steinberger²⁵ i Mel Schwartz²⁶.

En aquell moment es creia que només existia un sol neutrí, l'electrònic. Però tenien diversos problemes amb les desintegracions d'algunes partícules que no s'explicaven sense altres sabors de neutrins. Per això, els científics va decidir provar si realment existia o no un altre tipus de neutrí. L'experiment funcionava de la manera següent:

Es bombardejava un objectiu de beril·li amb un feix de protons que produïa una gran quantitat de pions ($\pi^\pm$). Es volien obtenir pions perquè era una manera senzilla i fiable de produir muons i neutrins associats a aquest mitjançant decaïments. Aquesta combinació de partícules passaven per un mur d'acer per eliminar totes les partícules del feix excepte els neutrins i eren analitzats en una cambra formada per 90 plaques d'alumini.

Segons el que es creia, els neutrins que creuaven el mur d'acer i xocaven contra els protons dels nuclis d'alumini havien de formar un neutró i un muó o un electró.

²² El nom prové de l'italià que significa "petit neutral" en honor a la seva massa i càrrega.

²³ Físic i professor universitari nord-americà guardonat amb el Premi Nobel de Física l'any 1995 pel seu codescobriments del neutrí.

²⁴ Físic i professor estatunidenc guardonat amb el Premi Nobel de Física l'any 1995 pel seu codescobriments del neutrí.

²⁵ Físic alemany amb nacionalitat estatunidenca conegut per codescobrir el neutrí muònic guanyant el Premi Nobel de Física l'any 1988.

²⁶ Físic i professor universitari estatunidenc guardonat amb el Premi Nobel de Física de l'any 1988 pels seus estudis sobre els neutrins.

Després de setmanes d'experimentació i proves, el que es va veure era que només s'emetien muons d'aquella transformació perquè si haguessin estat electrons, haurien interaccionat amb les làmines d'alumini, i no va ser el cas. La conclusió fou que els neutrins que havien fet xocar prèviament contra els protons d'alumini, eren diferents que els que es veien en les desintegracions β , ergo, havien descobert una nova partícula un neutrí associat al muó.

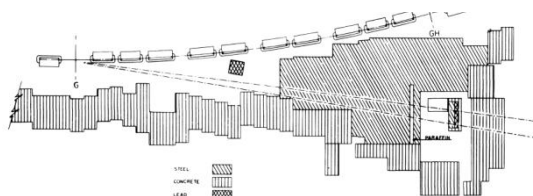
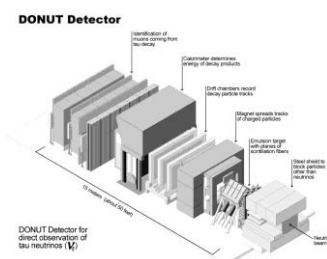


Figura 7. Plànols originals de l'experiment al laboratori Brookhaven on les dues línies rectes representen el feix de pions i neutrons

-NEUTRÍ TAUÒNIC (ν_τ)

L'existència del tau neutrí no va ser tan dubtosa com les altres. Un cop es va descobrir el tau a la dècada dels setanta ningú no dubtava del seu neutrí associat. Tot i això, la seva evidència que es va resistir més de vint anys fins que l'any 2000 va ser directament observat al DONUT²⁷ en un experiment del Fermilab, el mateix laboratori que va descobrir la tercera generació dels quarks.



**Figura 8. Plànols de l'experiment al Fermilab
36que descobrí el neutrí tau**

2.6.3. Els bosons:

Per a poder entendre el món tal com el coneixem hem de poder explicar com la matèria interacciona. Sabem que els quarks i els leptons són la matèria, però qui fa que es desintegrin i es converteixin en altres partícules? Qui és el responsable de mantenir-los units o que es repel·leixin? Qui els hi dona la massa?

²⁷ De l'anglès *Direct Observation of the NU Tau*.

Les encarregades d'aquestes tasques són les quatre forces fonamentals. Les forces interaccionen mitjançant partícules que s'anomenen portadores de les forces o camps. Aquestes partícules les coneixem com bosons²⁸ i n'hi ha 5 dels quals el bosó de Higgs és el més recent:

-FOTÓ (γ): Són els portadors de la força electromagnètica i no tenen càrrega ni massa. Com a conseqüència, són les partícules que viatgen més ràpidament de l'univers sent els formadors de la llum que viatja (al buit) a 300.000 km/s. La seva existència va ser predita per Albert Einstein l'any 1905 amb l'extensió del concepte *quanta* de llum de Maxwell per explicar l'efecte fotoelèctric que més tard coneixeríem com fotons.

-GLUÓ (g)²⁹: És la partícula encarregada de la força nuclear forta o interacció forta. Com el fotó, no té ni massa ni càrrega. És el responsable de mantenir enganxats els quarks dels nucleons. Fou plantejada l'any 1963 per Murray Gell-Man — el mateix que el dels quarks— i trobada el 1979 al DESY³⁰.

-BOSÓ W i Z³¹: Són tres (el Z, el W^+ i el W^-) partícules responsables de les interaccions dèbils. Tenen la funció de transmutar les partícules fonamentals, els quarks i els leptons. Descoberts al CERN l'any 1983, es va veure que eren partícules molt massives.

-BOSÓ DE HIGGS: És la partícula descoberta més recent de la física de partícules. El bosó de Higgs juga un paper crucial en el mecanisme que origina la massa de totes les altres partícules. Fou teoritzada per Peter Higgs³² entre altres el 1964 i detectada per primera vegada el 4 de juliol del 2012 al LHC, al CERN.

Com es pot comprovar, la força gravitatòria no és portada per cap partícula. Es creu, però, que sí que n'hi ha una, el gravitó tot i que encara no s'ha descobert experimentalment.

²⁸ El seu nom té origen al cognom de Satyendra Nath Bose, un físic indi conegut pel seu treball en mecànica quàntica proveint les bases per a l'Estadística de Bose-Einstein i la teoria de Condensat de Bose-Einstein.

²⁹ De l'anglès *glue* que significa cola.

³⁰ De l'alemany: Deutsches Elektronen Synchrotron.

³¹ Els noms provenen de l'anglès *weak* de la interacció dèbil el primer, i el segon probablement de la seva càrrega neutre, és a dir zero.

³² Físic anglès, conegut per la seva explicació i teorització de la partícula que porta el seu nom, el bosó de Higgs, i el mecanisme que dona la massa a les partícules.

2.7. Radioactivitat i estabilitat nuclear

Un cop vistes les partícules subatòmiques, ens centrem en l'àtom. L'àtom està format, com tothom sap, d'un nucli, conformat per una combinació de protons i neutrons i electrons orbitant al seu voltant.

El nucli descobert per Rutherford i els seus experiments³³ s'imagina com una esfera de radi R que depèn exclusivament del nombre de neutrons i protons d'aquest. Aquest nombre es coneix com a nombre nucleònic o nombre màssic (A). El nombre de protons o nombre atòmic (Z) són els que defineixen l'element. Quan als àtoms d'un mateix element amb nombre atòmic Z tenen diferent nombre màssic A (és a dir més o menys neutrons) denominem als variants isòtops.

Un nucli és estable quan existeix un equilibri entre les forces de repulsió elèctrica, és a

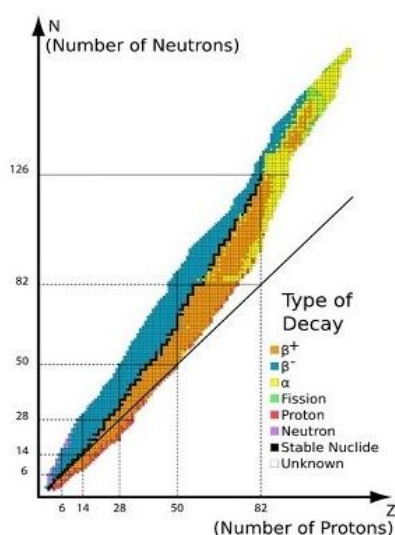


Figura 9. Tipus de decaïment en funció de la relació neutrons-protons

dir, la força electromagnètica dels protons, i les forces nuclears fortes que experimenten tant els protons com els neutrons. L'estabilitat, doncs, recau en la relació entre N i Z ³⁴. Com més protons, la repulsió elèctrica és més gran i, per tant, el nombre de neutrons ha d'augmentar perquè la força nuclear forta pugui contrarestar la repulsió.

La majoria de nuclis són estructures inestables, nuclis que no tenen l'energia requerida per mantenir-se units. Per aquesta raó, es desintegren en altres nuclis de forma que emeten radiació de forma natural i espontània buscant una estabilitat nuclear. Aquest procés és anomenat radioactivitat. L'interval de temps d'aquest procés va des d'una petita fracció de segon fins a milers de milions d'anys. Aquest temps és conegut com a temps de desintegració.

³³ El principal fou el de la làmina d'or, consistent en bombardejar amb partícules alfa una làmina d'or, les quals la travessaven sense problema, es desviaven lleugerament, o rebotaven contra ella.

³⁴ No confondre's amb què han de tenir el mateix nombre de protons que de neutrons.

Hi ha dos grans tipus de radiació:

❖ Radiació ionitzant:

La radiació ionitzant és tota aquella radiació que té l'energia suficient per extreure electrons dels àtoms (ionització) transformant-los en ions. En coneixem alguns tipus que es diferencien segons siguin corpusculars o ones:

➤ Radiació corpuscular:



Figura 10. Detector de fums que conté americi-241, un emissor de partícules α

-Partícules alfa (α): aquestes partícules són partícules positives constituïdes per 2 protons i dos neutrons, és a dir un catió d'heli (${}^4\text{He}^{2+}$). La radiació alfa és típica de nuclis massa grans per ser estables. Les partícules alfa no poden recórrer més de pocs centímetres a l'aire a causa del seu baix poder de penetració. Pot resultar nociu i perillós la inhalació o ingestió de substàncies emissores d'aquestes. Les partícules alfa són emeses en la desintegració d'elements com l'urani o l'americi, que es troba en alguns detectors de fums.

-Partícules beta (β): les partícules beta són, en canvi, electrons que s'emeten per buscar una estabilitat nuclear, usualment en un nucli on la relació N/Z és massa gran per tenir estabilitat. Els electrons, però, no es troben al nucli, és per això que aquesta emissió no és de cap electró que orbita l'àtom (el procés pel qual es produeixen reaccions químiques) sinó que és produït per una transformació, mitjançant la força nuclear feble (bosons W i Z), d'un neutró en: un protó, un antineutrí i l'electró, la partícula beta.

En diferenciem tres tipus segons siguin beta menys (β^-) beta més (β^+) i captura d'electró. El primer és el que s'ha explicat anteriorment. El segon té origen quan s'emet un positró en lloc d'un electró, pel fet que la relació N/Z és massa petita. La captura d'electró, en canvi, és aquella radiació on un electró es combina amb un protó per donar un neutró, que es queda al nucli, i un neutrí que s'emet: $p + \beta^- \rightarrow n + \nu_e$.



Figura 11. Manta de càmping gas antiga que conté tori, emissor de partícules α i β .

Les betes, a diferència de les seves germanes grans, les α , tenen una baixa energia de ionització pel fet de tenir una massa petita, però penetren més fàcilment frenant-se en alguns metres d'aire o una làmina d'alumini. Les partícules beta són emeses per radioisòtops com el potasi-40 o el tori, emprat antigament per fer les mantes de càmping gas.

-Neutrons: els neutrons en ser alliberats, són un tipus de radiació molt penetrant, a conseqüència de la seva càrrega elèctrica nul·la, i provoquen la divisió de l'estructura d'alguns àtoms pel que només poden ser frenats o absorbits per formigó o elements químics com el bor o el cadmi.

➤ Radiació electromagnètica/ Ones:

-Radiació gamma (γ): En aquest cas, les "partícules" gamma són radiacions electromagnètiques, ones, que acompanyen a l'emissió de partícules alfa o beta. Aquestes partícules són fotons amb una alta energia d'origen nuclear que té una penetració més alta que les altres, frenant-se emprant materials densos com el plom o el formigó. A canvi, la seva energia de ionització és relativament petita que pot provocar danys a la pell i als teixits del cos.

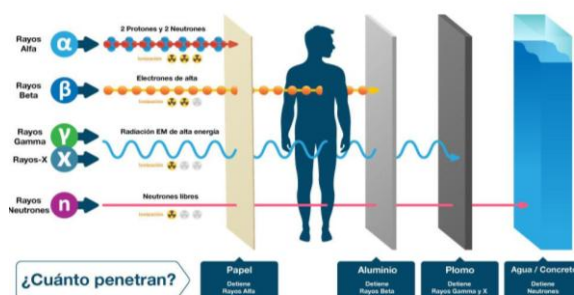


Figura 12. Nivells de penetració de les radiacions ionitzants

-Raigs X: Són fotons amb una alta energia d'origen extranuclear amb característiques similars a la radiació gamma.

❖ Radiació no ionitzant:

En aquest cas, són radiacions que tenen baixa energia i, per tant, no la suficient per extreure l'electró de l'àtom. Tots els tipus són des de les ones de baixa freqüència de l'espectre electromagnètic fins a la llum ultraviolada. Serien, doncs, les ones de ràdio i microones, l'energia de radiofreqüència dels telèfons mòbils, la llum infraroja i la ultraviolada.

2.8. Radioactivitat natural i artificial

Diferenciem també la radioactivitat segons la naturalesa i l'origen d'aquesta. Així doncs, ens trobem amb la radiació que té un origen natural i radiació que té un origen artificial.

A la naturalesa, trobem molts elements inestables o radioisòtops i, per tant, radioactius, tant a la radiació còsmica com a l'escorça terrestre. Sense anar més lluny, una gran part de radiació que absorbim prové del radó, un element causat en la desintegració del radi que trobem en les roques usades en construcció de cases. Així mateix, el nostre cos emet radiació com el carboni 14 o el potassi 40, elements indispensables per l'organisme i el bon funcionament d'aquest.

Per altra banda, trobem la radioactivitat artificial o induïda. Aquesta, és produïda a partir d'un isòtop obtingut mitjançant una reacció nuclear. Un clar exemple són els raigs X. La radioactivitat artificial s'empra sobretot en usos mèdics, des del tractament de càncer i malalties fins a tècniques de radiografia, conegut com a medicina nuclear.

2.9. Defecte de massa

Tothom, per lògica, creu que la massa del nucli correspon a la massa de les seves partícules constituents. Experimentalment, tanmateix, s'ha observat que la massa del nucli sempre és més petita que la dels nucleons sumats. Per tant, la massa dels protons i neutrons quan formen part del nucli és més petita que quan es consideren aïllats.

Aleshores, definim un nou concepte anomenat defecte de massa, considerat la diferència entre la massa dels nucleons aïllats i la massa del nucli. Seguint l'equació d'Einstein $E = \Delta m c^2$ anomenem l'energia del defecte de massa (Δm) com energia d'enllaç i donat que c^2 és un nombre molt elevat, un defecte de massa per petit que sigui comporta molta energia. Aquesta energia d'enllaç és important per calcular l'energia necessària per dividir el nucli, ja que és la mateixa que es requereix per formar-lo.

2.10. Decaïment radioactiu

Hem vist que perquè certs nuclis siguin “estables”, s’emeten partícules radioactives i el nucli inicial es transforma en un nucli diferent. Així doncs, en una desintegració radioactiva trobem el nucli que decau, anomenat nucli precursor o pare, i el nucli derivat o fill. Molts cops, els nuclis derivats tampoc són estables i per això decauen en altres nuclis fins que un d’ells tingui una estabilitat nuclear.

La llei experimental que descriu aquest procés la coneixem com llei de desintegració radioactiva, que expressa el nombre de nuclis desintegrats en funció del temps amb la següent equació (1):

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

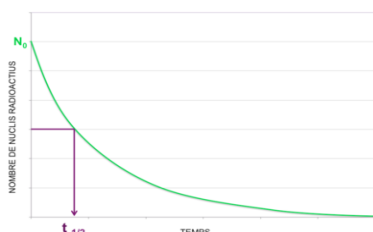


Figura 13. Els nuclis es desintegren seguint un decaïment exponencial

On N és el nombre de nuclis al final del decaïment; N_0 són els nuclis inicials; e és el nombre d’Euler, t és el temps i λ és una constant anomenada constant de decaïment, constant de desintegració o també coeficient de decaïment que depèn de cada nucli.

Cal dir, però que el decaïment és un procés aleatori (també anomenat estocàstic): no se sap amb exactitud quan decaurà una partícula en concret, però si tenim un nombre elevat d’àtoms que decauen (uns 10^{12}) es pot predir la mitjana de decaïments.

Per altra banda, una altra magnitud usada pels físics és el temps de semidesintegració o temps mitjà, és a dir, el temps que tarda un element a reduir-se fins a la meitat.

Aquest s’aïlla de l’equació (1) per obtenir que la semivida o temps de desintegració ($T_{1/2}$) és:

$$T_{(1/2)} = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ [s]} \quad (2)$$

Una altra magnitud útil és el de la vida mitjana (τ) que es designa generalment com:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \text{ [s]} \quad (3)$$

Que indica el temps mitjà de la partícula abans de desintegrar-se.

2.11. Sistemes de detecció de partícules

2.11.1. Cambra de boira

La cambra de boira, coneguda també com a cambra de Wilson³⁵, fou primerament utilitzada per descobrir el muó i el positró de la mà de Carl David Anderson³⁶. L'aparell serveix per veure el rastre de les partícules radioactives ionitzants que passen a través d'una atmosfera sobresaturada d'un gas.

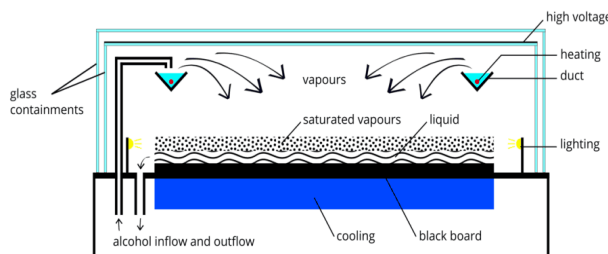


Figura 14. Funcionament d'una cambra de boira amb un circuit tancat d'alcohol

➤ Principi físic del funcionament:

Funciona gràcies al principi de sobresaturació d'una substància vaporosa. Aquesta sobresaturació és deguda al fet que l'aire no pot contenir més vapor d'una substància del que manté en un equilibri estable. Ara la qüestió és com crear aquesta sobresaturació. En algunes cambres, s'utilitza un feltre impregnat d'alcohol isopropílic situat a la part superior de la cambra s'evapora (ja que està a temperatura ambient) i cau a la base, on la temperatura canvia dràsticament gràcies a mantenir aquesta superfície a una temperatura molt baixa, utilitzant gel sec o altres mecanismes de refredament.

Doncs bé aquest estat inestable de sobresaturació permet que una sola pertorbació serveixi perquè es comencin a formar gotes d'alcohol líquid. Aquesta pertorbació en la cambra de boira seran els ions, creats quan una partícula ionitzant travessa l'ambient, que actuaran com a nuclis de condensació. És per això que, quan la partícula travessa, deixa una traça de gotes de boira que es poden veure a simple vista.

Antigament, s'emprava aigua com a la substància vaporosa que sobresaturava l'aire, però experimentalment s'ha vist que l'alcohol isopropílic és una opció molt més adequada, gràcies a la seva fàcil evaporació i baixa energia d'ionització, el que facilita la formació de nuclis de condensació.

³⁵ Físic escocès guardonat amb el Premi Nobel de Física l'any 1927 per la invenció de la cambra de boira.

³⁶ Físic estatunidenc que descobrí l'any 1932 el positró analitzant fotografies dels raigs còsmics en una cambra de boira.

2.11.2. Detector Geiger

El detector Geiger o comptador Geiger-Müller³⁷ és un aparell que s'utilitza en la detecció i mesura de la radioactivitat. Té aplicacions molt diverses: des de la



Figura 15. Detector Geiger comercial

dosimetria de radiació, protecció radiològica, física experimental, i la indústria nuclear. La radioactivitat que detecta és la coneguda com a radiació ionitzant (partícules alfa, beta i gamma). Cal remarcar, però que

els Geiger més barats no detecten partícules alfa, a causa del baix poder de penetració que les caracteritza, ja que no aconsegueixen travessar el tub. N'hi ha d'altres, però que són capaços de fer-ho utilitzant una finestra molt fina de mica i augmentant, en conseqüència, el preu.

El detector Geiger està format pel tub Geiger, un tub amb un ànode i un càtode en el qual s'afegeix un gas inert. Al ser travessat per radiació, aquesta ionitza el gas, el que inicia un cúmul d'electrons que viatgen a l'ànode i ions positius cap al càtode.

En arribar a l'ànode, els electrons creen un pols de voltatge detectat per l'electrònica del comptador Geiger. Aquesta electrònica es configura perquè soni un xiulet cada cop que es rep un impuls, és el conegut so que tothom identifica amb aquest instrument de mesura.

2.11.3. Detector de partícules alfa

Com hem dit anteriorment, les partícules alfa són partícules amb un molt baix poder de penetració pel que molts detectors Geiger són incapaç de detectar-les, ja que no poden creuar el tub per ionitzar el gas. Recentment, però, s'ha descobert que certs semiconductors (amb diverses modificacions) poden detectar partícules ionitzants i són capaços de detectar partícules alfa. Així doncs, el baix preu de fabricació i les possibilitats que oferia aquest dispositiu va fer que el meu professor construís un detector. El detector alfa està conformat per dues grans parts:

El funcionament es basa en el principi de la física d'estat sòlid conegut com generació de parells electró-forat considerat l'anàleg de la ionització del gas en el Geiger.

³⁷ En honor als seus creadors Walther Müller i Hans Geiger.

Aquesta generació és conseqüència del pas de la partícula ionitzant pel detector, el que provoca que els electrons s'excitin. Quan això passa, els parells d'electrons creen un senyal que és registrat i comptabilitzat pel detector.

El semiconductor encarregat de detectar les partícules α és un simple fotodíode BPW34 on amb molta cura, s'ha eliminat la part de l'encapsulat de plàstic que el protegeix tal com s'ensenya a les figures 18 i 19. D'aquesta forma les partícules α arriben directament a la unió PN i formen un pols elèctric d'intensitat proporcional a l'energia de la partícula incident.



Figura 17. BPW34 original



Figura 16. BPW34 modificat

Una sèrie de circuits electrònics segueixen al sensor i ens mostren la detecció i la mesura de les partícules α incidents.



Figura 18. Detector α emprat en la part pràctica

3. MARC PRÀCTIC

El marc pràctic es divideix en dues grans parts relacionades amb les partícules fonamentals i la seva detecció. La primera part és l'observació i visualització de partícules mitjançant una cambra de boira casolana. La segona, en canvi, consisteix a comptar aquestes partícules amb l'ajuda d'un comptador Geiger amb programació Arduino i un detector de partícules alfa, també amb Arduino basat en un fotodíode que va construir el meu professor del TR.

3.1. Visualització de partícules amb una cambra de boira:

Amb l'ajuda del projecte FORCES de la UB hem construït una cambra de boira basada en el principi física explicat anteriorment. En aquesta part, fou quan vaig comptar amb l'ajuda i suport del professor Joan Esteve, professor emèrit de la UB que em va guiar i ajudar a construir-la.

3.1.1. Parts i materials

La cambra de boira casolana disposa de les següents parts i materials:

1



1. CONTENIDOR: Un recipient transparent per observar sigui de plàstic o de vidre.

2



2. FELTRE: Serà l'encarregat d'asorbir l'alcohol per observar sigui de plàstic o de vidre.

3



3. IMANTS: Tenen la funció de mantenir adherit el feltre a l'interior del contenidor.

4



4. IL·LUMINACIÓ: Per visualitzar les traces de forma clara serà de gran ajuda la utilització de llums com unes LED en forma de tira.

5



5. SAFATA METÀL·LICA: Servirà com a base de la cambra i estarà en contacte amb el gel sec.

6



6. SAFATA: Contindrà el gel sec que estarà en contacte amb la safata metàl·lica per refredar-la.

7



7. ALOCHOL ISOPROPÍLIC/ ISOPROPANOL: Serà la substància que se sobresaturarà. Perquè la cambra funcioni, ha de ser d'una concentració d'un 90 % o més.

8



8. GEL SEC/ NEU CARBÓNICA/ CO2 : Serà el material que refredarà la safata metàl·lica i crearà la sobresaturació necessària perquè es vegin les traces.

3.1.2. Procediment

Per fer la cambra, vaig anar primerament a la Universitat de Barcelona. Allà juntament amb el professor vam fer un primer intent de cambra de boira. El primer dia no hi havia gel sec, i vam haver de recórrer al nitrogen líquid com l'encarregat de refredar la superfície de la safata metàl·lica. Així doncs, vam substituir la safata que contenia el gel sec per una caixa de porexpan on abocàvem el nitrogen líquid:



Figura 19. Muntatge de la cambra de boira amb nitrogen líquid

Els primers intents no van tenir èxit i no vam poder visualitzar cap traça. Vam assumir i detectar, doncs, dos errors principals. Un d'ells es fonamentava en el fet que la visibilitat de la caixa era molt reduïda, tant per la mida d'aquesta, com per la falta de transparència. L'altre, en canvi, era que la caixa no estava segellada completament i, com a conseqüència, entrava i sortia aire, el que impossibilitava la sobresaturació i creava una mena de boira que no era l'adequada per l'observació.

Així doncs, l'endemà vam millorar aquestes errades i vam usar el gel sec que ja teníem disponible. A més, vam comprar una caixa més gran per millorar la visió i vam posar-hi un feltre diferent. Per tal que l'experiment funcionés, havíem d'assegurar-nos que la safata metàl·lica arribés a la temperatura adequada la qual comprovàvem amb el termòmetre. En esperar una estona, vam veure que arribava i vam començar el muntatge. Ja teníem disposats la safata amb el gel sec i damunt l'altra safata metàl·lica.

Aleshores, vam impregnar amb l'isopropanol el feltre que prèviament havíem adherit al contenidor amb ajuda dels imants. Un cop fet això, vam posicionar el contenidor transparent sobre la safata i envoltar aquesta amb els llums LED en forma de tires. Ja acabat el muntatge calia esperar aproximadament entre deu i quinze minuts perquè l'alcohol s'evaporés i seguís el procés pel qual crearia la boira.



Figura 20. El penjoll de tori a l'interior de la cambra de boira amb gel sec

Acabada l'espera, podíem observar— tot i que amb molta esma— una mena de boira que és el que estàvem buscant. Però perquè les traces es veiessin, feia falta radiació ionitzant, i és per això que vam inserir una font de radioactivitat beta, un penjoll que conté tori.

3.1.3. Resultats i conclusions

Aquests són els resultats que vam obtenir:

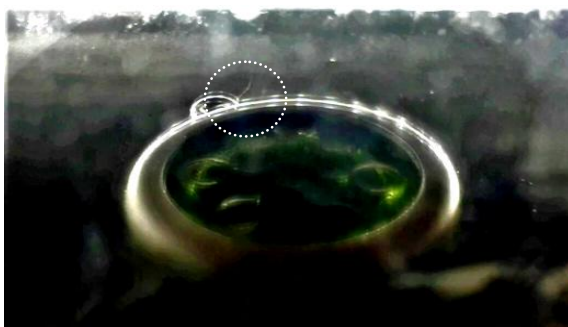


Figura 22. Traces dels e- emesos pel penjoll de tori



Figura 21. Les trajectòries dels electrons amb alta energia són rectilínies

Es pot advertir que les traces són petites línies que pertanyen a una traça d'electró (o positró). Sabem que el tori del qual està fet el penjoll és un emissor beta, el que podem comprovar sabent que aquest tipus d'emissions emeten electrons i positrons els quals es veuen per la traça a la boira.

Amb aquest experiment he extret diverses idees. La primera de totes és que, tot i que podem arribar a pensar que les partícules subatòmiques no existeixen perquè no les veiem, realment estan per tot arreu.

La segona és la capacitat d'enginy humà per analitzar les partícules d'una manera molt clara (potser no amb el meu cas, però sí amb cambres de boira de qualitat) mitjançant mètodes indirectes d'observació. M'ha fascinat entendre com funciona la cambra i veure amb els meus ulls que aquelles partícules de les quals he parlat a la part teòrica realment existeixen.

La tercera és que hi ha molts errors que es poden corregir degut al desconeixement empíric. Per exemple, la falta d'un segellament perfecte feia que hi hagués un corrent d'aire, el que provocava una boirina molesta per l'observació i dificultava que l'aire se sobresaturés. També la col·locació de les llums no era la més adequada podent-se millorar tapant la part superior perquè la llum no incidís de manera directa. En últim lloc, l'alcohol s'havia de col·locar manualment al fentre i no sabies la quantitat què hi havia per saber si era necessària més; això, per exemple, es podria corregir implementant un circuit tancat d'alcohol.

3.2. Experimentació amb el detector Geiger i el detector alfa:

El nostre detector Geiger està controlat per l'Arduino, és a dir, el software que s'encarrega de rebre l'impuls elèctric i transformar-lo —si cal— en so i en comptes és programat amb aquesta plataforma. És per això que, he hagut de fer un codi exclusivament per això agafant com a base el que ens recomanava el venedor del Geiger i modificant-lo segons els objectes d'estudi o els interessos de cada experiment. El detector de partícules alfa, així mateix, també s'utilitzava amb l'Arduino i el codi principal es troba a l'annex ...



Figura 23. El model de Comptador Geiger emprat en les experiències

3.2.1. Càlcul estadístic de la radiació de fons:

Objectiu: Comparar la radioactivitat que es detecta en materials i veure quina és la realitat que emet el material radioactiu eliminant la radiació de fons per a posteriors experiments.

Materials:

- Detector Geiger amb tub

Fonament teòric:

Al nostre voltant estem rodejats de radiació provinent dels raigs còsmics originats al sol, passant per emissions naturals d'elements a la terra com el radó o l'urani i la radiació que emet el nostre cos. Aquesta radiació, anomenada radiació de fons, que no és la intenció d'estudi en els experiments pot causar errors i imperfeccions que afecten directament als resultats. Per aquesta raó, s'han de prendre mesures per tenir-les en compte pels experiments que es duren a terme.

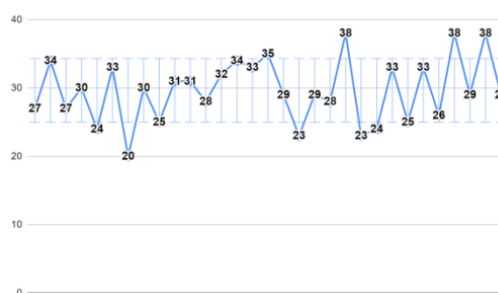
Procediment:

Inicialment, es mesuren els CPM de l'ambient allunyat de tot material radioactiu. Per fer això, es faran 10 mesures dels CPM que aniran registrant-se a gràcies al codi Arduino explicat anteriorment modificat perquè els comptes també apareguin a la pantalla.

Anàlisi de dades:

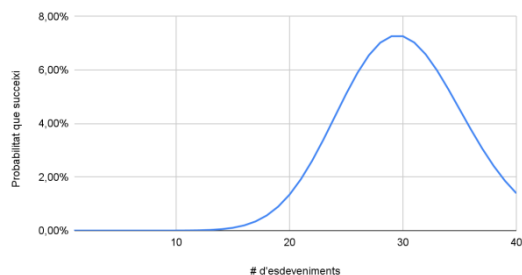
RADIACIÓ DE FONS (CPM)	
27	35
34	29
27	23
30	29
24	28
33	38
20	23
30	24
25	33
31	33
1	26
28	38
32	29
34	38
33	29
MITJANA: 30 CPM	

Taula 1. CPM de la radiació de fons



Gràfica 1: Representació de les CPM de la radiació de fons on la desviació estàndard figura com a barres d'error

S'ha obtingut una mitjana d'uns 30 CPM, un resultat raonable que es podria trobar a qualsevol lloc. D'aquests 30 CPM, la major part provindrà del radó ambiental i dels raigs còsmics.



Gràfica 2. Distribució Poisson de la radiació de fons

La desviació estàndard obtinguda de la mostra amb l'Excel és de $4,67 \cong 5$ el que ens dona una idea del nostre grup d'estudi i l'interval dels CPM que podem trobar mesurant la radiació de fons. Mirant els resultats i aplicant aquesta desviació, veiem que per ser segurs, haurien d'estar entre 25 i 35 CPM. Hi ha tres mesures que sobrepassen aquest interval, les 3 de 38 CPM el que segurament és degut a un augment puntual de les emissions naturals.

Observant els gràfics i les dades³⁸, veiem que els 30 CPM són els comptes que major probabilitat tenen, ja que és la mitjana. També podem extreure que les probabilitats augmenten a mesura que es compleix la desviació estàndard corresponent, tal com era d'esperar a una distribució de Poisson representada a la gràfica 2.

³⁸ Vegeu annex 6.1

3.2.2. Blindatge de mostres radioactives:

Objectiu: Diferenciar els tipus de radiacions ionitzants veient experimentalment els seus poders de penetració així com comprovar quina radiació ionitzant emeten les fonts radioactives quantitzant-la.

Materials:

-Geiger, detector alfa, làmines d'alumini, làmina de plom, fonts emissores de radiació

Fonaments teòrics:

Coneixem tres tipus de radiacions ionitzants: les partícules alfa, beta i gamma. Totes elles són ionitzants perquè tenen la capacitat de convertir àtoms en ions extraient electrons. Tanmateix, el que les diferencia és el poder de penetració i el d'ionització degut a la seva naturalesa.

El poder de penetració, el que ens interessa per aquest experiment, consisteix en la capacitat d'una partícula ionitzant de travessar la matèria. Té una relació inversament proporcional amb la massa, és a dir, com més petita sigui la partícula més podrà penetrar així com amb la seva velocitat. És per aquesta raó que les partícules alfa, amb una massa superior a les altres dues, tenen un baix poder de penetració. Les betes, en canvi, tenen una massa molt inferior pel que poden arribar a travessar un full de paper però no una làmina d'alumini; i les gammes amb una energia més elevada han de ser frenades amb una làmina de plom o grans gruixos de formigó.

També cal explicar que en aplicar un blindatge a radiacions electromagnètiques (raigs X i radiació gamma) la intensitat d'aquestes segueix la llei d'atenuació representada amb la fórmula (4):

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

On I és la intensitat que travessa el blindatge; I_0 és la intensitat emesa inicialment; e és el nombre d'Euler, x en cm és el gruix del blindatge i μ (cm^{-1}) és el conegut com coeficient lineal d'atenuació, una constant que depèn del material de què està fet el blindatge i de l'energia de la radiació gamma incident.

Procediment:

Per a dur a terme l'experiment empraré tres fonts radioactives diferents:

- Un detector de fums amb americi-241 que emet α i γ
- Penjoll de tori-232 que emet α β i γ
- Manta de càmping gas que també conté tori-232 que emet α β i γ

Part I. Comparació de la intensitat de les fonts:

En aquest experiment es van mesurar les intensitats (que es troben als annexos 6.2, 6.3 i 6.4) de cada una de les fonts i comprovar quin tipus de radiació emetien.

Per fer això, es van emprar els dos detectors de què es disposa. En primer lloc, el detector de partícules alfa va mesurar les partícules emeses pel detector de fums. A continuació, s'introduïa el blindatge utilitzat que, en aquest cas, era un full de paper.

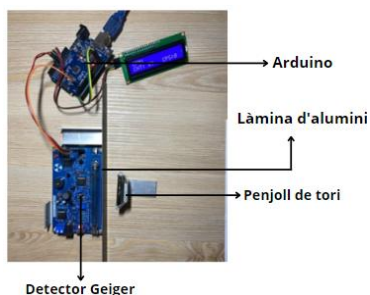


Figura 24. Muntatge experimental del blindatge d'alumini

Per altra banda, es va fer servir el detector Geiger i es van detectar les partícules, mesurant, per tant, la intensitat de la font i el seu poder de penetració. Això es va aconseguir afegint a la distància que separava el Geiger (2 cm), làmines d'alumini de 0,06 cm, veient quina era el gruix que frenava totes les partícules β .

Part II. Càlcul del coeficient lineal d'atenuació de l'alumini per emissors de tori:

Un cop mesurades les intensitats de les fonts i basant-nos en les dades obtingudes anteriorment, es calcula el coeficient lineal d'atenuació de l'alumini per energies aproximades a 500 KeV, pròpies de la radiació gamma emesa per la cadena de desintegració del tori.

El coeficient lineal d'atenuació es calcula aïllant de l'equació (4):

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

$$\ln(I) = \ln(I_0) - \mu x \Rightarrow \mu = \frac{\ln(I) - \ln(I_0)}{x}$$

Suposarem que $I \simeq N$ i calcularem el coeficient en funció del gruix de l'alumini.

Anàlisi de dades:

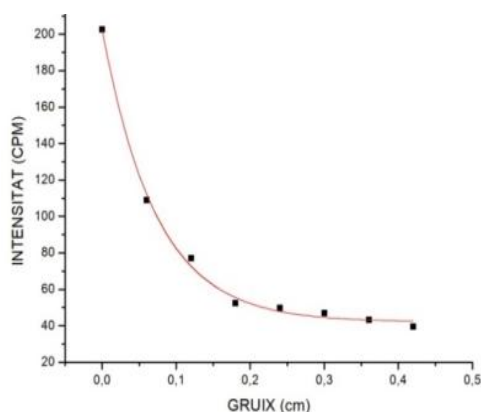
Part I. Comparació de la intensitat de les fonts:

❖ Emissor alfa:

➤ Detector de fums:

GRUIX (mm)	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42
VALOR MIG DE 10 MESURES (CPM)	103,4	87,4	78,8	73,9	74,8	78,4	71,6	75,6

Taula 2. Valor mig de les dades experimentals de la intensitat del detector de fums



Gràfica 3. Representació de les dades obtingudes de la intensitat del detector de fums

El detector de fums emet tant partícules α com radiació γ . Ja que el Geiger no detecta les primeres, es pot observar en el gràfic la emissió gairebé constant de partícules que són, sobre el paper, gamma. Tanmateix, les dues primeres dades, que no segueixen el patró constant poden ser degudes a la mesura d'altres partícules que amb un blindatge menor són detectades. Les explicacions corresponents, però, s'escapen als coneixements d'un alumne de 2n de Batxillerat.

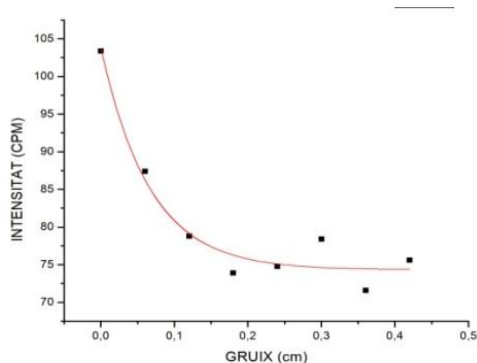
❖ Emissors beta:

➤ Penjoll de tori:

GRUIX (mm)	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42
VALOR MIG DE 10 MESURES (CPM)	202,8	109,1	77,2	52,4	49,8	47	43,3	39,5

Taula 3. Valor mig de les dades experimentals de la intensitat del penjoll de tori

Es pot advertir un tipus de decaïment exponencial propi de les desintegracions radioactives que sembla mantenir-se constant a partir de les 4 làmines (0,18 cm). Això



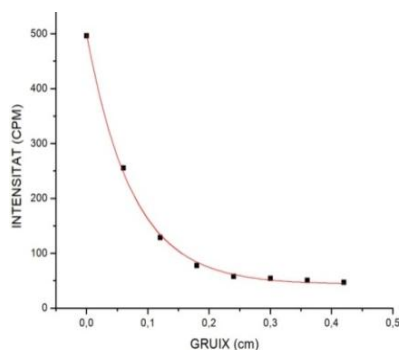
Gràfica 4. Representació de les dades obtingudes de la intensitat del penjoll de tori

és degut al fet que el blindatge ha frenat la totalitat de partícules β^- i les partícules detectades pel Geiger són radiació γ . Podem deduir doncs que que el blindatge funciona efectivament amb 0,2 cm o 2 mm d'alumini aproximadament. Cal remarcar, però, que la radiació γ no arriba a ser constant perquè el blindatge atenua la intensitat d'aquesta, fenomen que calcularem més endavant.

➤ Manta de tori:

GRUIX (mm)	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,30	0,36	0,42
VALOR MIG DE 10 MESURES (CPM)	496,2	255,8	128,9	78,1	57,9	54,7	50,9	47,2

Taula 4. Valor mig de les dades experimentals de la intensitat de la manta de tori



Gràfica 5. . Representació de les dades obtingudes del la intensitat d'una manta de càmping gas de tori

El mantell de tori també presenta un decaïment exponencial, però, a diferència del collar, el gruix d'alumini que frena totes les partícules β^- és de 0,24 mm. Aquesta diferència pot ser deguda a la intensitat de la font, sent la manta de tori més radioactiva que el collar. En aquest cas, la radiació γ també és atenuada i, en ser el mateix blindatge, el coeficient lineal d'atenuació hauria de ser aproximadament el mateix.

-Part II: Càlcul del coeficient lineal d'atenuació de l'alumini per emissors de tori:

Atès que la llei d'atenuació només s'aplica a la radiació electromagnètica, les mesures del coeficient lineal començaran quan la radiació beta hagi estat blindada totalment. En el cas del collar, el blindatge efectiu és de 0,18 cm i en la manta, de 0,24 mm. Que aquest sigui el blindatge efectiu no vol dir que es mesuri el coeficient des d'aquí, ja que part de la intensitat inicial continua sent beta. Per això, començarem a calcular a partir dels gruixos següents.

• Collar de tori:

Aplicant l'equació 1 amb els següents gruixos:

GRUIX (cm)	0,24	0,3	0,36	0,42
$\mu_{Al} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	0,212	0,193	0,273	0,210

Taula 5. Coeficients lineals d'atenuació de l'alumini obtingut amb les dades del collar de tori

Fent la mitjana obtenim un coeficient lineal d'atenuació de **$0,222 \text{ cm}^{-1}$** en energies de 500 KeV. Gràcies a dades obtingudes experimentalment sabem que l'alumini té un μ de $0,228 \text{ cm}^{-1}$ per radiació electromagnètica de 500 KeV. Per això, podem deduir que el coeficient mesurat en aquest experiment dista molt poc de la realitat.

• Manta de tori:

GRUIX (cm)	0,3	0,36	0,42
$\mu_{Al} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	0,190	0,200	0,180

Taula 6. Coeficients lineals d'atenuació de l'alumini obtingut amb les dades de la manta de tori

En el cas de la manta de tori, també obtenim mesures bastant acurades del coeficient sent, en aquest cas, la mitjana de $0,190 \text{ cm}^{-1}$.

Les mesures obtingudes tenen uns errors relatius de 2,6 i 16,7 % respectivament. Això ens mostra que la primera mesura amb el penjoll de tori és molt acurada mentre que les experiències fetes amb la manta de tori són, certament, menys precises.

3.2.3. Càlcul del temps mort dels detectors de partícules:

Objectiu: Calcular el temps mort tant del nostre Geiger com del detector α

Materials:

- Geiger, dues fonts emissores iguals

Fonament teòric:

Entre dos esdeveniments (considerant esdeveniments com la detecció d'una partícula) existeix un temps que els separa. Durant aquest temps, qualsevol detector de radiació és incapaç de "funcionar" el que significa que no detecta cap partícula ionitzant. Això, pot ser degut al mateix detector o a l'electrònica associada. Aquest temps s'anomena temps mort.

En el cas del Geiger, sabem que el tub detecta radiació quan ionitza el gas dins del Geiger, el que crea un cúmul d'electrons que viatgen a l'ànode i ions positius cap al càtode. En arribar a l'ànode, els electrons creen un pols de voltatge detectat per l'electrònica del comptador Geiger. Durant aquest temps on s'ionitza el gas i els electrons creen el pols, si hi arriba una altra partícula, el detector no la percebrà, per petit que aquell temps sigui. El temps mort no és un temps general sinó que depèn exclusivament de cada detector i l'electrònica que el fa funcionar. Conèixer el temps mort, pot ser important per algunes mesures que requereixen un alt grau de precisió. En aquest experiment, calcularem el temps mort del tub de GM utilitzant primerament el mètode de dues fonts.

Procediment:

El mètode de dues fonts consisteix a prendre 3 mesures diferents i serà imprescindible dues fonts emissores iguals. Primerament, es mesuraran els CPM d'una font. A continuació, a la mateixa distància que el primer, es farà la mesura de la segona font. Finalment, es mesuraran les dues fonts alhora i s'anotaran tots els resultats. En aquest cas, hem fet deu mesures per disminuir l'error i hem fet les mitjanes.

Un cop obtingudes les dades que es troben als annexos 6.5, 6.6 i 6.7, s'haurà de passar els CPM a CPS (per obtenir el temps en segons i no en minuts) dividint-se entre 60. El temps mort doncs surt de l'expressió (5) extreta de la literatura [7]³⁹

$$T = \frac{S_1 + S_2 - S_3}{2S_1S_2} \quad (5)$$

On T és el temps mort, S_1 és la primera mesura d'una font, S_2 és la segona mesura de l'altra font i S_3 és la mesura de les dues fonts emissores juntes.

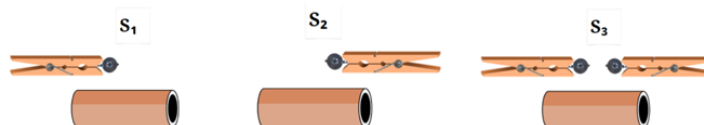


Figura 25. Esquema gràfic del mètode de les dues fonts

Anàlisi de dades i conclusions:

➤ Geiger:

	MESURA S_1 (CPS)	MESURA S_2 (CPS)	MESURA S_3 (CPS)
MITJANA (CPS)	4,75	4,29	8,31

Taula 7. Mitjana de les dades de les tres mesures diferents pel càlcul del temps mort del Detector Geiger

Seguint l'equació (5) per calcular el temps mort:

$$T = \frac{S_1 + S_2 - S_3}{2S_1S_2} = \frac{4,75 + 4,29 - 8,31}{2 \times 4,75 \times 4,29} = 0,0179 \text{ s} \approx \mathbf{0,02 \text{ s}}$$

Obtenim que el temps mort del nostre Geiger és de 0,0179 segons o 17,9 mil·lisegons. Sabem que el temps mort dels detectors Geiger es troba dins un interval d'entre 90 i màxim 500 microsegons, és a dir uns 0,5 mil·lisegon. La mesura obtinguda, però dista d'aquest interval pel qual es podria pensar que el resultat és incorrecte. La realitat, però, és que la causa d'aquest temps aparentment anòmal és degut a l'electrònica associada de l'Arduino. Això es pot comprovar repetint el mateix procés amb el detector alfa:

➤ Detector Alfa:

	MESURA S_1 (CPS)	MESURA S_2 (CPS)	MESURA S_3 (CPS)
MITJANA (CPS)	19,9	18,0	24,7

Taula 8. Mitjana de les dades de les tres mesures diferents pel càlcul del temps mort del Detector Alfa

³⁹ Usman, Shoaib & Patil, Amol. Radiation detector dead time and pile up: A review of the status of science. Nuclear Engineering and Technology. 2018

Fent els càlculs necessaris el temps mort del detector alfa és:

$$T = \frac{S_1 + S_2 - S_3}{2S_1S_2} = \frac{19,9 + 18 - 24,74}{2 \times 19,9 \times 18} = 0,0184 \text{ s} \approx \mathbf{0,02 \text{ s}}$$

El resultat és gairebé idèntic que en el cas del Geiger i, per tant, té la mateixa congruència. Veient que els dos detectors tenen un temps mort gairebé exacte, podem extreure que aquesta similitud és definida per la utilització de la mateixa electrònica, la de l'Arduino. Tot i això, no estava totalment convençut i amb la intenció d'assegurar-me, vaig fer la mateixa experiència amb un altre detector Geiger similar, però en aquest cas que funcionava sense Arduino.



Figura 26. Detector Geiger comercial de la marca GQ Electronics, model GMC-500+ mesurant la radiació d'una font

➤ Geiger Model:

En aquest cas, els resultats que s'han obtingut són els següents:

	MESURA S ₁ (CPS)	MESURA S ₂ (CPS)	MESURA S ₃ (CPS)
MITJANA (CPS)	2,90	2,93	5,77

Taula 9. Dades de les tres mesures diferents pel càlcul del temps mort del Geiger Model

Fent els càlculs seguint la fórmula (5) obtenim que el temps mort és de:

$$T = \frac{S^1 + S^2 - S^3}{2S^1S^2} = \frac{2,92 + 3,10 - 5,26}{2 \times 2,92 \times 3,10} = 0,0419 \text{ s} \approx \mathbf{0,04 \text{ s}}$$

Partint d'aquests resultats i sabent que el Geiger sense Arduino també té una electrònica associada (tot i que diferent) es dedueix que la major part del temps mort és conseqüència directa de les electròniques.

3.2.3. Determinació de la radiació ocasionada pel radó present a les cases:

Objectiu: Calcular la concentració de radó a diferents parts d'un habitatge i esbrinar si aquest segueix les recomanacions de seguretat.

Materials:

-Globus, detector Geiger, cel·lo

Fonament teòric:

El radó (Rn) és un gas radioactiu fruit del decaïment d'elements com l'urani o el tori. Com he dit amb anterioritat, aquest, està present al sòl i es troba en materials de



Figura 27. Muntatge experimental per la detecció del radó

construcció com rajoles, maons o formigó. Per aquesta raó i perquè es pot acumular en espais tancats, la presència del radó és molt comuna sobretot dins les cases.

El radó pot arribar a ser molt perillós, no tant per la pròpia inhalació, sinó per la seva desintegració que crea àtoms de metalls pesants que en unir-se amb aerosols, romanen als pulmons quan s'inhalen. El problema que ocasiona això és que aquells àtoms o els seus descendents emeten partícules

alfa, nocives per les cèl·lules pulmonars que poden derivar en un càncer de pulmó, ja que alteren l'ADN dels teixits pulmonars. Per aquesta raó és important mantenir uns baixos nivells de radó on el paper dels detectors és imprescindible per saber si patim perill.

Procediment:

L'experiment, doncs, consistirà en la mesura del radó a l'ambient d'una habitació mitjançant un globus i un detector. Inicialment, s'infla un globus i el carregarem electroestàticament fregant-lo amb el nostre cabell o amb una microfibra. Seguidament, es penja amb cel·lo al sostre de l'habitació que ha d'estar completament tancada (portes i finestres) deixant-se reposar durant 60 minuts.

Quan acaba el temps, s'haurà de desinflar amb molta cura per tal d'evitar que surti disparat. Aquest globus conté, en la seva superfície, el radó de l'ambient i els seus fills (altres partícules, conseqüència del decaïment) els quals seran mesurats amb el nostre detector Geiger. A més de contar la radiació, diferenciarem els resultats obtinguts de 3 habitacions diferents distribuïdes per l'habitatge a estudiar, esbrinant quina sala és més radioactiva. Aquestes 3 habitacions són un garatge i un menjador ubicat a la planta baixa de la casa, i un lavabo que es troba a la part superior. Per finalitzar, compararem les dades obtingudes amb les recomanacions dels experts per veure si l'habitatge estudiat és segur.

Anàlisi de dades:

Per començar a analitzar les 3 habitacions diferents s'ha de tenir en compte la radiació de fons. Com les mesures han estat preses al mateix lloc on vam mesurar aquesta radiació de fons durant el primer experiment la prendrem com a referència. S'han realitzat 21 mesures a fi d'obtenir resultats més fiables. La taula es troba a l'annex 6.8 i aquestes són les mitjanes:

	MOSTRA GARATGE (CPM)	MOSTRA MENJADOR (CPM)	MOSTRA LAVABO (CPM)
MITJANA DE 21 EXPERIMENTS	112	56	31
MITJANA-RADIACIÓ DE FONS	82	26	1

Taula 10. Mitjana dels CPM del radó ocasionat a diferents parts de l'habitatge

L'experiència feta al garatge, la columna ressaltada en groc, ha obtingut els majors CPM de les tres experiències. Per altra banda, analitzant la mostra del menjador, la segona columna, es pot afirmar que la radiació és baixa, però no tot i no ser uns resultats molt elevats si són existents.

Els resultats del lavabo, en canvi, demostren que la radiació ocasionada pel radó és gairebé inexistent, ja que aquests 31 CPM són conseqüència de la radiació de fons mesurada prèviament i no del radó. Comparant els 3 resultats podem veure una diferència clara. Mentre que les mostres del garatge i el menjador han mostrat emetre radiació, les experiències del lavabo no manifesten cap signe d'aquesta.

Tenint en compte que les dues primeres es troben a la primera planta i que la tercera s'ubica a una planta superior, es pot asseverar que hi ha una relació entre les plantes i la radiació.

Aquesta relació és causa directa de l'origen del radó: Sabem que gran part del radó de les cases s'origina en les desintegracions d'urani i tori que es troba en les roques del sòl, i que entra dins les cases filtrant-se pel terra dels habitatges a través de les petites fissures i juntes que existeixen en qualsevol construcció. Per aquesta raó, la planta baixa és la que més radiació evidencia mentre que el radó del terreny no aconsegueix arribar a la planta alta on s'ubica el lavabo perquè és un gas més pesat que l'aire.

Ara bé, si només ens basem en l'origen del radó, no s'explica la diferència entre els resultats de les habitacions de la primera planta, ja que reben el mateix radó del sòl. Per això recorrem a l'acumulació de radó. El radó tendeix a acumular-se a zones baixes, però sobretot en espais amb poca ventilació, característica pròpia dels garatges, mentre que un menjador ha de disposar d'una millor ventilació, d'aquí la diferència (56 CPM) entre resultats.

En conclusió, es pot asseverar que la concentració de radó decreix amb l'altura i que,

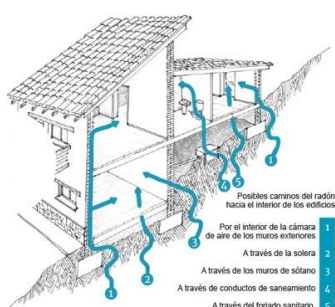


Figura 28. Diferents maneres de infiltració del radó a les cases

per tant, la major part del radó que rebem prové del sòl del terreny. També s'extreu que els nivells establerts per les agències de seguretat es respecten en l'habitatge analitzat: la normativa actual de la Comisió Europea de 21 de febrer 1990 (90/143/Euratom) estableix que els nivells de radó en habitatges ja construïts no hauria de sobrepassar els 400 bq/m3. La màxima radiació que hem obtingut són els 82

CPM del garatge que, fent la conversió, obtenim 1,37 becquerels⁴⁰. Tenint en compte que el garatge ocupa uns 75 m3, la concentració de radó és de 0,0183 bq/m3 una xifra molt allunyada de les recomanacions.

Cal remarcar, però, que el detector Geiger amb què hem mesurat el radó del globus no detectava partícules alfa que representa gran part de la radiació d'aquest element. A més, el sistema emprat per la detecció no pretén buscar una exactitud per la simplicitat d'aquest. Per aquesta raó, les dades no són prou significatives per afirmar una plena seguretat, però sí suficients per asseverar que la radiació és baixa.

3.2.4. Experiment amb KCl:

Objectiu: Calcular la radioactivitat i observar la realitat que les partícules radioactives no estan tan lluny com pensem.

⁴⁰ El becquerel és una unitat de radiació equivalent a una desintegració per segon. Es diferencien de les CPS perquè a conseqüència del temps mort i altres factors les contes obtingudes no són les mateixes que les desintegracions, ja que algunes no són detectades.

Materials:

-KCl, detector Geiger amb tub

Fonament teòric:

Podem trobar radiació a tot arreu. Ja hem vist que pot provenir dels raigs còsmics o del radó de les cases. Tanmateix, també sabem que molts isòtops naturals contenen aquesta radioactivitat com el carboni-14 i el potassi-40 emesos tant pel nostre cos com per aliments que podem trobar al supermercat. Alguns casos són el plàtan o el KCl un substituent de la sal comuna per gent que pateix hipertensió contenint tots dos aliments el potassi-40, el radioisòtop que s'estudiarà en aquest experiment.

Procediment:

Primerament, mesurem la radiació de fons durant uns 60 minuts que ens serà imprescindible per a fer l'experiment. En aquest cas, ja disposem de les dades obtingudes prèviament i serà la radiació de fons que utilitzarem. Per començar, s'afegeix la sal de potassi (KCl) a un recipient i s'apropa el màxim possible al Geiger. Emprant la radiació de fons obtinguda (30 CPM) es faran 10 comptes per veure la radiació obtinguda.

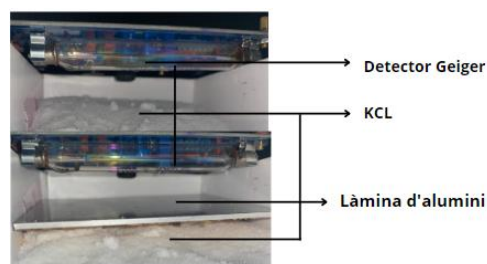


Figura 29. Muntatge experimental de l'experiment amb KCl

Gràcies a estudis, se sap que en les desintegracions de potassi-40 tenen un 89,25% de probabilitats que s'emeti una partícula beta i un 10,55% que es produeixi la captura d'electró on un electró es combina amb un protó per donar un neutró, que es queda al nucli, i un neutrí que s'emet seguint la fórmula $p + \beta^- \rightarrow n + \nu_e$.

La qüestió és que quan aquest procés es produeix, el nucli de l'àtom es troba en un estat excitat⁴¹ i per tornar al nivell fonamental emet radiació γ .

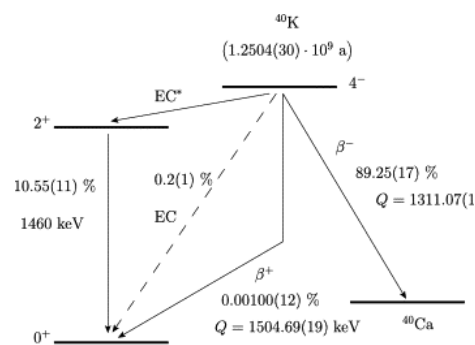


Figura 30. Esquema de decaïment del ⁴⁰K

⁴¹ Es coneix com a estat excitat quan un o més electrons d'un nucli ocupen nivells d'energia superiors als quals els correspondria en la seva configuració bàsica.

Sabent això volem comprovar experimentalment aquest procés i comprovar la seva validesa. Per a obtenir resultats més fiables es faran 3 experiències diferents on es comptaran els CPM de la sal de potassi (KCl). A continuació de cada experiència, seguint el principi físic que hem emprat en l'experiment anterior, hi posarem una làmina de paper d'alumini que frenarà la radiació beta i només obtindrà la gamma.

Anàlisi de dades:

Les dades obtingudes en l'experiència 1, ubicades a l'annex 6.9 demostren que l'emissor KCl emet una mitjana de radiació d'uns 58 CPM (tenint en compte la radiació de fons). En canvi, quan s'hi posa davant la làmina de paper alumini, aquesta radiació baixa dràsticament fins a obtenir els 9 CPM que s'observa a la taula:

	SENSE BARRERA	AMB BARRERA
MITJANA EXPERIÈNCIA 1 - RF (CPM)	58	9

Taula 11. Mitjana de la primera experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense

En la teoria, sabem que de les 58 partícules en podem trobar tant gammes com betes; a diferència dels 9 comptes que són indubtablement gammes, ja que les betes són frenades per la barrera. Les dades obtingudes en l'experiència 1 demostren que l'emissor KCl emet una mitjana de radiació d'uns 58 CPM (tenint en compte la radiació de fons). En canvi, quan s'hi posa davant la làmina de paper alumini, aquesta radiació baixa dràsticament fins a obtenir els 9 CPM que s'observa a la taula.

En la teoria, sabem que de les 58 partícules en podem trobar tant gammes com betes; a diferència dels 9 comptes que són indubtablement gammes, ja que les betes són frenades per la barrera. Per comprovar els percentatges dits amb anterioritat sabem que hi ha una probabilitat del 89,55% que la partícula emesa sigui β^- i un 10,25% que sigui γ . Si la totalitat de partícules són 58 en un minut:

$$\text{-Partícula } \beta^- \rightarrow 58 \times 89,55\% = 51,94 \text{ partícules} \simeq 52 \text{ partícules/minut}$$

$$\text{-Partícula } \gamma \rightarrow 58 \times 10,25\% = 5,945 \text{ partícules} \simeq 6 \text{ partícules/minut}$$

La pràctica de l'experiència ens diu que de les 58 partícules 49 són β^- i 9 són γ pel que la comparació amb la teoria és de ± 3 CPM.

En l'experiència 2 s'obtenen les dades corresponent a l'annex 6.10 i aquestes són les mitjanes:

Seguint el mateix procés per verificar si es compleixen o no les prediccions:

	SENSE BARRERA	AMB BARRERA
MITJANA EXPERIÈNCIA 2 - RF (CPM)	59	8

Taula 12. Mitjana de la segona experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense

Partícula $\beta^- \rightarrow 59 \times 89,55\% = 52,83 \text{ partícules} \approx 53 \text{ partícules/minut}$

Partícula $\gamma \rightarrow 59 \times 10,25\% = 6,048 \text{ partícules} \approx 6 \text{ partícules/minut}$

La pràctica de l'experiència ens diu que de les 59 partícules 51 són β^- i 8 són γ pel que la comparació amb la teoria ara només varia ± 2 CPM.

Per finalitzar, amb l'experiència 3, que es troba a l'annex 6.11, s'han obtingut els següents resultats:

	SENSE BARRERA	AMB BARRERA
MITJANA EXPERIÈNCIA 3 - RF (CPM)	66	37

Taula 13. Mitjana de la tercera experiència de les mesures en CPM emeses pel KCl amb blindatge i sense

Partícula $\beta^- \rightarrow 66 \times 89,55\% = 59,10 \text{ partícules} \approx 59 \text{ partícules/minut}$

Partícula $\gamma \rightarrow 66 \times 10,25\% = 6,765 \text{ partícules} \approx 7 \text{ partícules/minut}$

La pràctica de l'experiència ens diu que de les 66 partícules 59 són β^- i 7 són γ . En aquest cas, la predicció es compleix exactament, ja que experimentalment s'han obtingut el mateix nombre de partícules, tant gammes com betes.

	SENSE BARRERA ($\beta^- + \gamma$)	AMB BARRERA (γ)	β^- calculades	γ calculades
MITJANA EXPERIÈNCIA 1 - RF (CPM)	58	9	52	6
MITJANA EXPERIÈNCIA 2 - RF (CPM)	59	8	53	6
MITJANA EXPERIÈNCIA 3 - RF (CPM)	66	7	59	7

Taula 14. Comparació de les 3 experiències del decaïment del ^{40}K

En conjunt, podem aseverar que l'esquema del decaïment del ^{40}K es compleix experimentalment ja que totes les dades es corresponen i s'apropen als valors reals.

4. CONCLUSIONS

Un cop acabat el meu treball i després d'haver fet la recerca d'informació adient així com els diferents experiments que conformen el marc pràctic he arribat a diverses conclusions que passo a explicar.

En primer lloc, he après a cercar informació, assimilar-la i sintetitzar-la, diferenciant les informacions verídiques de les pseudocientífiques. A més tenint en compte que el gran gruix de la informació es troba en anglès he pogut millorar la meva comprensió quant a termes científics en aquesta llengua.

En segon lloc, m'he adonat dels canvis de paradigma en el pensament científic i com han anat evolucionant al llarg del segle XX, ajudant a millorar en molts casos la vida quotidiana de la humanitat, fabricant nous materials i investigant, per exemple, en el camp de la medicina nuclear responsable de curar malalties com el càncer.

Conèixer l'interior de la matèria és un dels reptes actuals dels físics i sobretot poder donar resposta a alguna de les qüestions científiques més arrelades, com el Model Estàndard o l'origen de l'Univers. Tanmateix, encara queden molts interrogants per contestar que espero algun dia poder ajudar a resoldre, ja que la meva intenció és estudiar en el camp de la Física.

Un altre aspecte del meu treball ha estat adonar-me que la radiació és un fenomen quotidià amb el qual convivim diàriament, perquè la matèria que ens envolta l'emet contínuament. Ara però, encara que rebem radiació de forma constant, no significa que representin sempre un perill real per la nostra salut, ja que usualment els nivells són molt baixos.

D'altra banda, les radiacions ionitzants que he pogut estudiar no es poden observar a ull nu i, en conseqüència, creiem que no existeixen. Els mètodes experimentals que he emprat demostren que no només formen part de la matèria, sinó que es poden comptar i visualitzar mitjançant aparells de detecció adequats.

Per comptar-les he fet ús de diversos aparells capaços de detectar les radiacions ionitzant, la qual cosa m'ha permès analitzar-les. Això ha estat possible emprant una programació del software Arduino que ha estat modificada per poder recollir les dades de les experiències mitjançant un comptador Geiger, permetent-me arribar a la conclusió que no només existeixen, sinó que a més es poden quantitzar, complint així un dels objectius que m'havia proposat al començament del treball.

Amb el propòsit de visualitzar les partícules fonamentals, he tingut la possibilitat de treballar amb el professor emèrit de la UB, Joan Esteve, construint una cambra de boira que m'ha permès observar la radiació beta emesa per un penjoll conformat per òxid de tori. En paral·lel, amb l'ajuda del meu tutor Albert Navarro, hem fabricat una versió alternativa d'aquesta cambra de boira amb materials més assequibles.

Com a conclusió he pogut veure que tot i que considerem la cambra de boira com un aparell sofisticat, la realitat, com s'ha comprovat, és que la dificultat de construcció és mínima i que, per tant, la possibilitat d'observar partícules fonamentals està a l'abast de tothom.

Per tot això considero que he complert els objectius personals que em vaig marcar a l'inici del treball. Personalment estic molt orgullós de la capacitat de dissenyar, portar a terme i analitzar experiments complexos, que m'han permès arribar de forma individual a conclusions que han donat resposta a algunes de les meves inquietuds quant a l'estudi de l'existència de les partícules elementals i la radiació.

En un primer moment, tenia la intenció d'analitzar l'energia de les partícules emeses i diferenciar-la segons l'emissor corresponent, però, malauradament, no he disposat del temps suficient per dur-ho a terme el que serviria com a futures línies d'investigació d'aquest TR.

5. REFERÈNCIES I WEBGRAFIA

- [1] Ros, Eduardo. Física de partículas: Historia del modelo quark. IFIC. 2020
- [2] Poudel, Parashu Ram. Quarks and Their Discovery. Himalayan Physics 1. 2011
- [3] Mohapatra, R. N. et al. "Theory of neutrinos." High Energy Physics - Phenomenology. 2004
- [4] Von Schlippe, Wladimir. The History of the W and Z Bosons. Queen Mary, U. of London and St. Petersburg, INP. 2013 DOI: 10.22323/1.183.0023
- [5] Young, Hugh D., Roger A. Freedman, Victoria A. Flores Flores, Alberto Rubio Ponce, y Javier Enríquez Brito. *Sears [y] Zemansky Física Universitaria*. 12a. ed. --. Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación. 2009
- [6] Perl, M.L. The Discovery of the Tau Lepton and the Changes in Elementary-Particle Physics in Forty Years. *Phys. perspect.* 6, 401–427. 2004
- [7] Usman, Shoaib & Patil, Amol. . Radiation detector dead time and pile up: A review of the status of science. Nuclear Engineering and Technology. 2018
- [8] Bornd, Richard. Determining the Resolving Time of a Geiger-Müller Tube Northern Illinois University
- [9] Hubbell, John. Radiation detection and measurement, 3rd Edition, Glenn F. Knoll; Wiley, New York, 2000 ISBN 0-471-07338-5. 2001
- [10] Iovine, John. Nuclear Experiments Using A Geiger Counter. 2020
- [11] A. D. Burgos , A. L. Álvarez, Y. E. Villalba. Determinación del coeficiente de atenuación para radiación gamma del plomo, el aluminio y el acero mediante un contador de centelleo. Laboratorio de física moderna, Departamento de física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 2017
- [12] D. Héctor Eulogio Alonso Hernández. El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 2015
- [13] Akyurek. A new dead-time determination method for gamma-ray detectors using attenuation law. Nuclear Engineering and Technology. Volume 53, Issue 12. ISSN 1738-5733. 2021.
- [14] Mera, Eduardo. Atenuación por blindaje ii e_mera. es.slideshare. net/EduardoMera1/ atenuacin-por-blindaje-ii-emera.
- [15] *III. INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA.* bibliotecadigital.ilce. edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_6.ht.
- [16] *NIST: X-Ray Mass Attenuation Coefficients - Aluminum.* physics.nist.gov//PhysRef Data/XrayMassCoef
- [17] Connor, Nick. «¿Qué es el coeficiente de atenuación lineal y masiva? - Rayos X - Definición». *Radiation Dosimetry*. www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-coeficiente-de -atenuacion-lineal-y-masiva-rayos-x-definicion.
- [18] *Radiación natural y artificial - CSN.* www.csn.es/ca/radiacion-natural-y-artificial2.

- [19] Aparici, Alberto. «Los tres sabores del neutrino». *La Razón*, 29 de julio de 2020, www.larazon.es/ciencia/20200729/qkhjt7cjjfhpfn7utzdyardma.html.
- [20] *The Particle Adventure* | *What is the world made of?* | *The naming of quarks*. www.particleadventure.org/quarknaming.html.
- [21] *Quark*. www.quimica.es/enciclopedia/Quark.html.
- [22] *Quarks*. hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Particles/quark.html.
- [23] «SLAC at 50: honouring the past and creating the future →». *CERN Courier*, 8 de septiembre de 2021, cerncourier.com/a/slac-at-50-honouring-the-past-and-creating-the-future.
- [24] Santander, Mariano. «Del átomo al Higgs VIII: Los quarks, desde su propuesta hasta su “descubrimiento” (1961 a 1974)». *Una vista circular*, 10 de septiembre de 2015, unavistacircular.wordpress.com/2013/10/13/del-atomo-al-higgs-viii-los-quarks-desde-su-propuesta-hasta-su-descubrimiento-1961-a-1974.
- [25] *Just a moment...* www.encyclopedia.com/science/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/muon-discovery.
- [26] «Neutrino y desintegración beta (β) — Astronoo». © Astronoo, www.astronoo.com/es/articulos/neutrino.html.
- [27] Nuledo. «Acerca de cámara de niebla». *Nuledo*, www.nuledo.com/es.