

Física — 12.º ano

12 — Estrutura Atómica e Nuclear. Modelos atómicos de Bohr e Schrödinger. Espectros atómicos e energia dos níveis. Estrutura nuclear, isótopos e radioactividade.



José Pedro do Amaral zp.amaral@colegiodestomas.com

1882–1970



Teoria atômica

uma resenha histórica

- URL da Teoria Atômica
 - [http://81.193.71.45/~amaral/Historia dos Modelos Atomicos.html](http://81.193.71.45/~amaral/Historia_dos_Modelos_Atomicos.html)

Mecânica quântica

para se entender o desenvolvimento da teoria atômica moderna

- A mecânica quântica foi introduzida por Max Planck, mas foi desenvolvida por uma variedade de outros: Einstein, Bohr, Schrödinger, de Broglie, Heisenberg, Born e Dirac (entre muitos outros).
- Tem havido um espírito de auto-crítica forte: Einstein era um crítico do princípio de incerteza de Heisenberg e de uma abordagem estocástica em geral, favorecendo ao invés uma abordagem determinística; Planck achava que a sua hipótese seria substituída por uma diferente e melhor; Dirac achava estranho obter valores negativos e positivos para a carga do electrão.
- A mecânica quântica tem tido um grande sucesso a explicar o comportamento de átomos, moléculas e núcleos.
- Tal qual como a relatividade, a mecânica quântica requer um ajuste das nossas ideias pré-concebidas acerca da realidade do mundo físico.
- Falaremos de duas aplicações da teoria quântica: 1. o efeito fotoeléctrico e 2. o efeito de Compton, e como nos levaram à teoria atômica moderna.

Radiação de um corpo negro e a hipótese de Planck

- Um objecto a qualquer temperatura emite radiação térmica.
 - A baixas temperaturas, essa radiação é sobretudo nos infra-vermelhos, com um aumento de temperatura, começará a emitir nos vermelhos e eventualmente no branco. Um estudo cuidadoso mostrará que com um aumento de temperatura haverá um aumento contínuo dos λ dos infra-vermelhos aos ultra-violetas.
- De acordo com a física clássica, a radiação térmica deriva de cargas aceleradas perto da superfície do objecto. Estas cargas aceleradas termicamente poderão ter uma distribuição de acelerações à qual corresponderá o espectro contínuo emitido pelo objecto.
- Esta abordagem clássica não explica o fenómeno observado num corpo negro. Com um aumento de temperatura, a quantidade total de energia aumenta. Também com esse aumento de temperatura, os picos das distribuições mudam para λ mais curtos. Esta mudança obedece à lei de Wien onde $\lambda_{\text{máx}}$ é o pico da curva da distribuição e T é a temperatura absoluta do objecto (1 K é -273° C).

$$\lambda_{max} \cdot T = 0,2898 \times 10^{-2} m \cdot K$$

- As primeiras experiências que tentaram explicar o perfil das curvas destas distribuições falharam!
- Lei de Rayleigh-Jeans (k_B é a constante de Boltzmann):
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c \cdot k_B T}{\lambda^4}$$
- $I(\lambda, T)d\lambda$ é a potência por unidade de área emitido no intervalo $d\lambda$. Para λ longos, a lei de Rayleigh-Jeans está razoavelmente de acordo com os dados experimentais, mas para λ curtos há uma grande discrepância. Conceptualmente, se λ tender para o zero então $I(\lambda, T)$ deveria tender para infinito.
- Consequentemente, λ curtos deveriam predominar e a densidade da radiação emitida por um corpo negro deveria ser infinita no limite de frequências elevadas ou de comprimentos de onda curtos. A chamada *catástrofe ultra-violeta*.

- Os dados experimentais mostraram que $I(\lambda, T)$ permanece finito e que a potência total por unidade de área também permanece finita.
- Em 1900, Planck formula uma hipótese que explica completamente a dinâmica do fenómeno (h , a constante de Planck, é $6,626 \times 10^{-34}$ Js):

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1)}$$

- Na sua hipótese, Planck tomou dois pressupostos ousados e controversos em relação à natureza das moléculas oscilantes na superfície do corpo negro.
 1. As moléculas só poderão ter unidades discretas de energia E_n , descritas por: $E_n = nhf$ (em que n é um número inteiro positivo — o número quântico — e f é a frequência de vibração das moléculas). Isto implica que a energia esteja **quantizada** e que cada valor discreto de energia represente um **estado quântico** distinto!
 2. As moléculas emitiriam ou absorveriam energia em pacotes discretos chamados fótons. As moléculas emitirão ou absorverão estes fótons, saltando de um estado quântico para o outro. Se o salto for de um estado para outro imediatamente adjacente, por exemplo de $n=3$ para $n=2$, então $E=hf$. Assim, uma molécula irradia ou absorve energia somente quando muda de estado quântico.

- O ponto-chave da hipótese de Planck é o pressuposto radical da existência de estados quânticos de energia.
- Quando Planck apresentou isto, a maior parte dos cientistas (incluindo como já disse, o próprio Planck!) não consideraram realista o conceito quântico. Daí terem continuado à procura de outra explicação para a radiação do corpo negro.
- Contudo, mais trabalho de investigação mostrou que a teoria quântica tinha que ser usada para explicar outros fenómenos ao nível atómico. Validando no processo o seu poder explicativo e a existência de estados quânticos.

Problemas

mecânica quântica

1. A temperatura da superfície da pele humana é de aproximadamente 35° C. Qual é o λ do pico da radiação que emite?

Lei de Wien: 35° C são 308 K e assim $\lambda_{\max} = 0,2898 \times 10^{-2} / 308 = 9,41 \times 10^{-6} \text{ m}$

2. Uma massa de 2 kg está ligada a uma mola sem massa ($k=25 \text{ N/m}$). A mola é esticada 0,4 m da sua posição de equilíbrio e largada.

A. Calcula classicamente a energia total e a f de oscilação.

$E = 1/2 kA^2$, onde A é a amplitude de deslocamento, 2,0 J, e $f = 1/2\pi \sqrt{k/m}$, 0,56 Hz

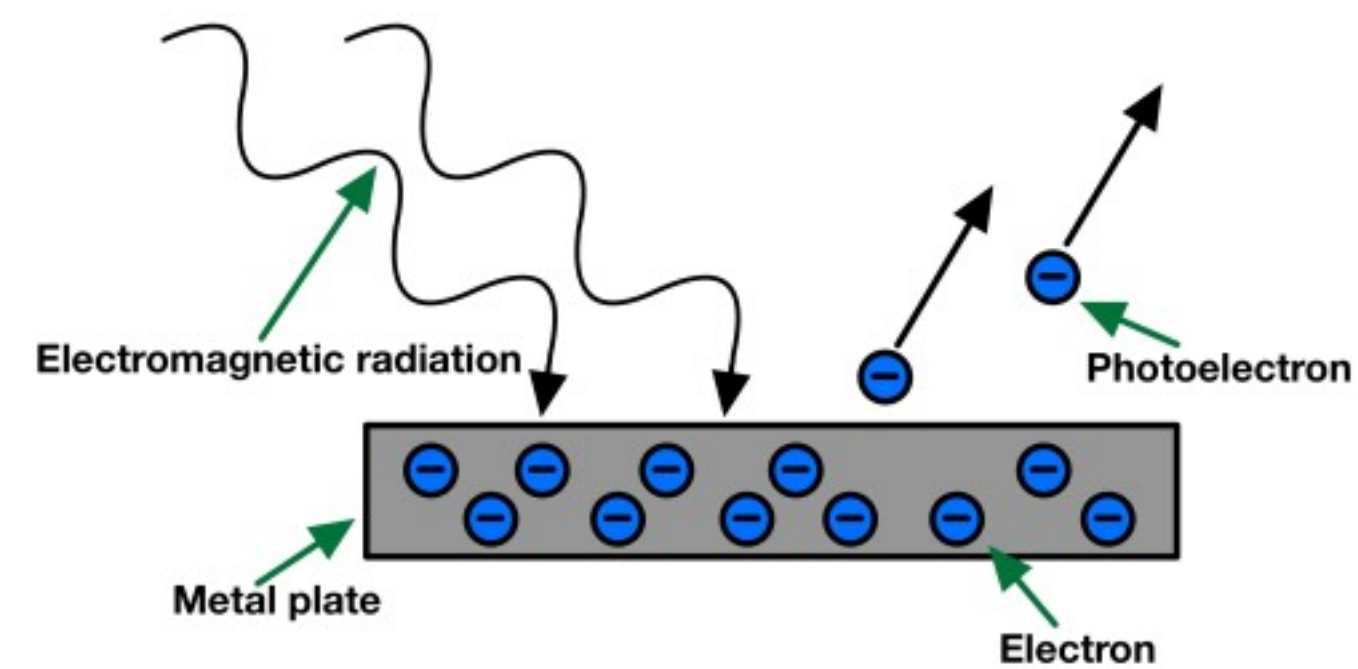
B. Se a energia estiver quantizada, qual é o número quântico do sistema?

$E_n = nhf$ e $n = 5,4 \times 10^{33}$

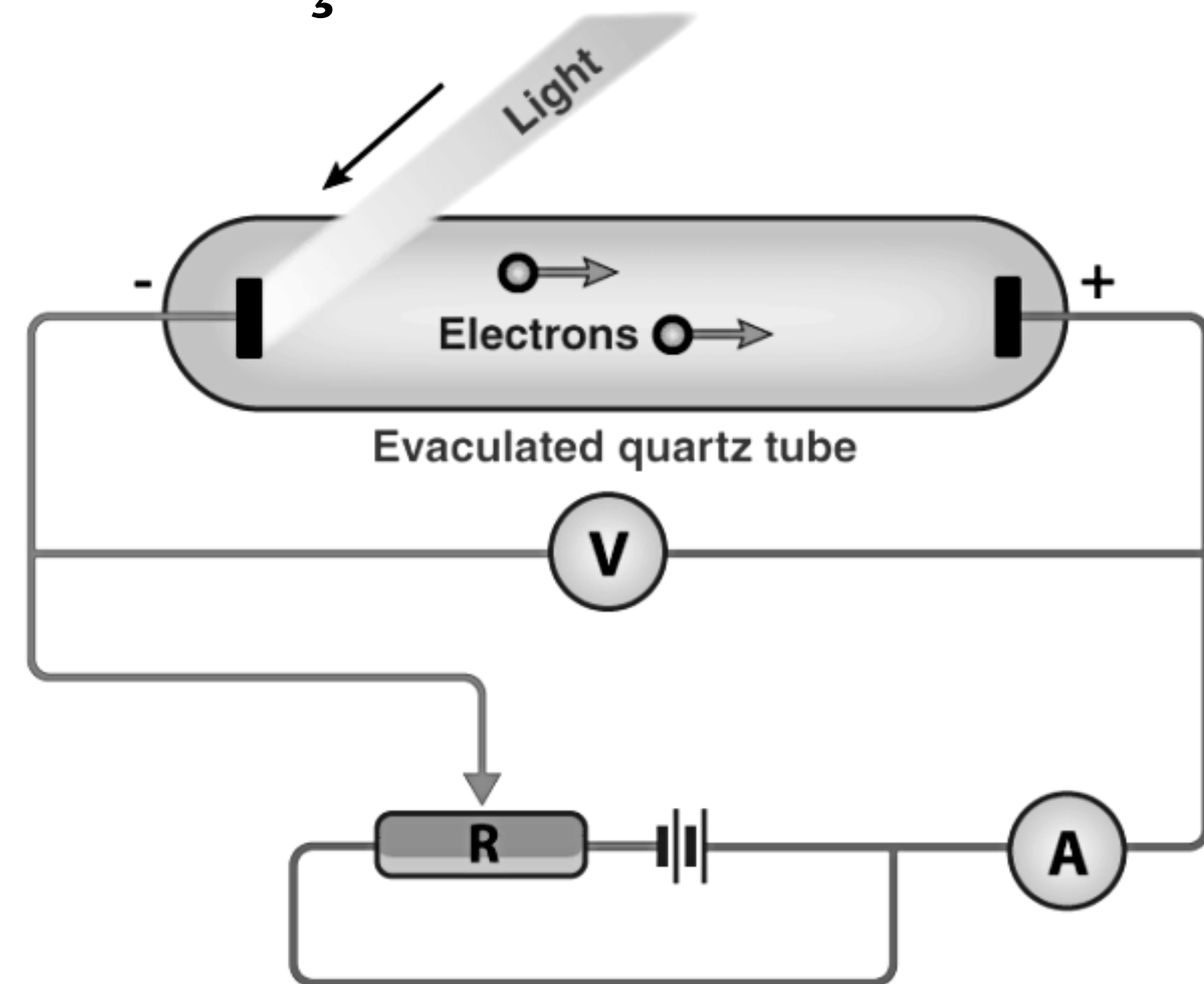
C. Quanta energia é transferida numa mudança quântica?

$3,7 \times 10^{-34} \text{ J}$ (efeitos quânticos só relevantes ao nível microscópico?)

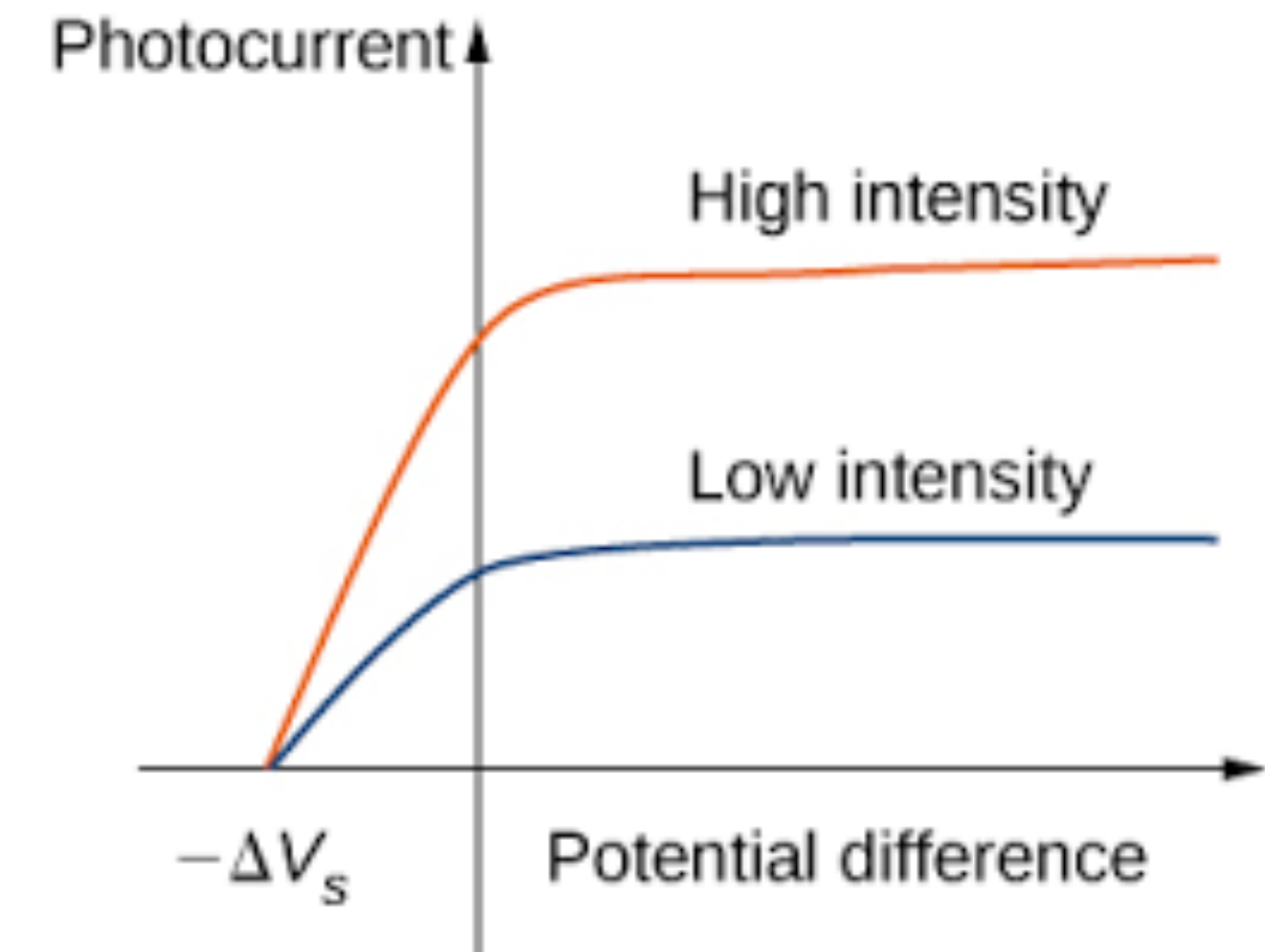
O efeito fotoelétrico



Luz incidente pode causar a libertação de fotoelectrões.



Se houver luz com um certo λ haverá corrente, mas sem luz não.



Se V for menor ou igual a $-V_s$ (o potencial de paragem) a corrente I será 0. A corrente I aumentará com a intensidade luminosa mas saturará a valores elevados de ΔV .

- Várias características do efeito fotoeléctrico não podiam ser explicadas com a física clássica ou a teoria de onda.
 1. Não há emissão de electrões se a f da luz incidente for abaixo de um certo valor que é característico do metal que está sendo iluminado. Isto é uma inconsistência com a teoria de onda que prevê que o efeito fotoeléctrico deveria ocorrer a qualquer f desde que a luz tenha uma intensidade suficiente.

$$K_{max} = eV_s$$

4. A Energia cinética máxima do fotoelectrão é independente da intensidade da luz incidente.
5. A energia cinética máxima dos fotoelectrões aumenta com um aumento de f .
6. Os fotoelectrões são emitidos da superfície do metal quase instantaneamente (menos de 10^{-9} s) depois da superfície ser iluminada, mesmo quando a luz é pouquíssimo intensa. Classicamente, esperaríamos que os electrões demorassem algum tempo para absorver a radiação incidente até atingirem energia cinética suficiente para saírem do metal.

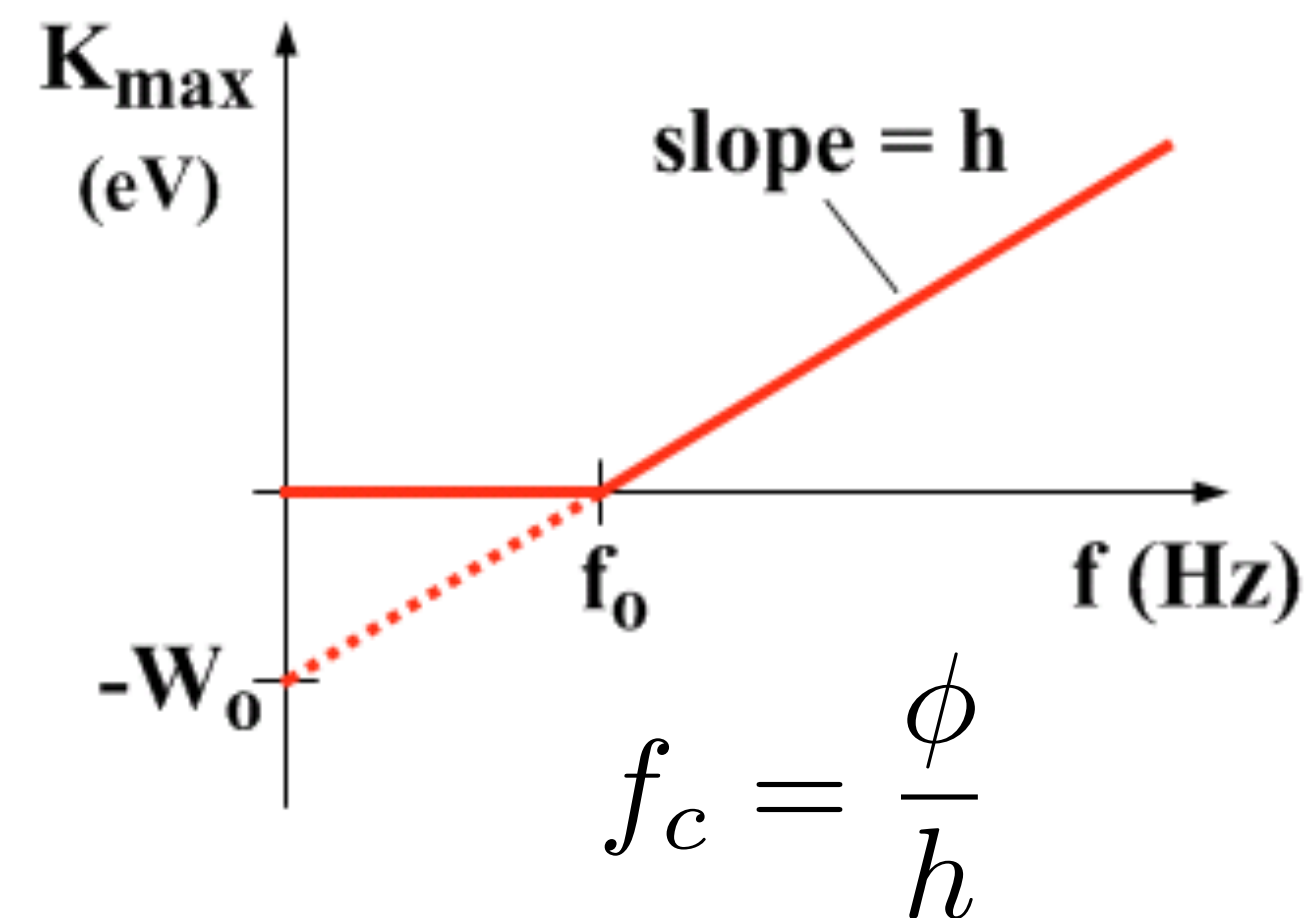
- Einstein dá uma explicação para o efeito fotoeléctrico em 1905 (o mesmo ano em que publica a sua teoria espacial da relatividade) como parte de um artigo por causa do qual receberia o Prémio Nobel da Física em 1921.
- Einstein expandiu o conceito de quantização da ondas electromagnéticas. Ele partiu do pressuposto que qualquer luz de frequência f poderia ser considerada como uma corrente de fotões em que cada fotão teria a energia E dada por $E=hf$.
- Einstein considerou que cada fotão seria tão localizado que daria toda a sua energia hf a um só electrão no metal. Assim, a energia cinética máxima para esses electrões libertados seria:

$$K_{max} = hf - \phi$$

- Onde ϕ é a função de trabalho desse metal e representa o mínimo de energia que liga o electrão ao metal.

<i>metal</i>	ϕ (eV)
Na	2,46
Al	4,08
Cu	4,70
Zn	4,31
Ag	4,73
Pt	6,35
Pb	4,14
Fe	4,50

- Conseguimos assim perceber que:
 1. O efeito fotoeléctrico não seja observado abaixo de uma certa f limite porque a energia do fotão terá que ser maior ou igual a ϕ . Se assim não for, os electrões não serão ejectados mesmo que a intensidade luminosa seja muito elevada.
 2. $K_{\max}$ é independente da intensidade luminosa. Se a intensidade luminosa for duplicada, o número de fotões será duplicado. Contudo, a sua energia cinética depende exclusivamente de f e de ϕ e não da intensidade.
 3. $K_{\max}$ é directamente proporcional a f .
 4. Os electrões são emitidos quase instantaneamente por causa da natureza de partícula da luz. O fotão é um pacote de energia localizada que colide com o electrão numa correspondência de 1:1. Isto contrasta com o ter a energia dos fotões distribuída uniformemente numa área de incidência luminosa grande.



- Trabalho experimental corroborou Einstein.
- A frequência limite f_c (no gráfico f_0) corresponde a um comprimento de onda limite λ_c .

- E assim...

$$\lambda_c = \frac{c}{f_c} = \frac{c}{\frac{\phi}{h}} = \frac{hc}{\phi}$$

- Comprimentos de onda maiores que λ_c incidentes num metal com uma função de trabalho ϕ não resultarão na emissão de electrões.

- E para lançar o tema seguinte...
- Einstein: um fotão de energia E viaja numa direcção única e tem momento

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c}$$

- *«If a bundle of radiation causes a molecule to emit or absorb an energy packet hf , then a moment with quantity hf/c is transferred to the molecule, directed along the line of the bundle for absorption and opposite the bundle for emission.» — Albert Einstein*

O efeito de Compton

- Em 1923, Arthur Holly Compton (1894–1962) and Peter Debye (1884–1966) independentemente (nota: é sempre com um fascínio imenso que aprendo estes casos de descobertas concomitantes, quase como se fora a consequência de uma confluência e sintonia súbitas de ideias no *Zeitgeist*) estenderam a ideia de Einstein.
- Experiências com fótons de raios-X mostraram que o choque e desvio entre esses fótons e electrões poderia ser explicado se se tratassem os fótons como partículas pontuais com energia hf e momento hf/c , e se se pressupusesse que a energia e momento do par electrão-fóton fossem conservados numa colisão entre eles.
- A teoria clássica não explicava o comportamento observado. Após a colisão, o fóton apresentava um λ maior do que antes da colisão.

- Equação do desvio de Compton

$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta)$$

- $h/mc = 0,00243$ nm comprimento de onda λ_c de Compton

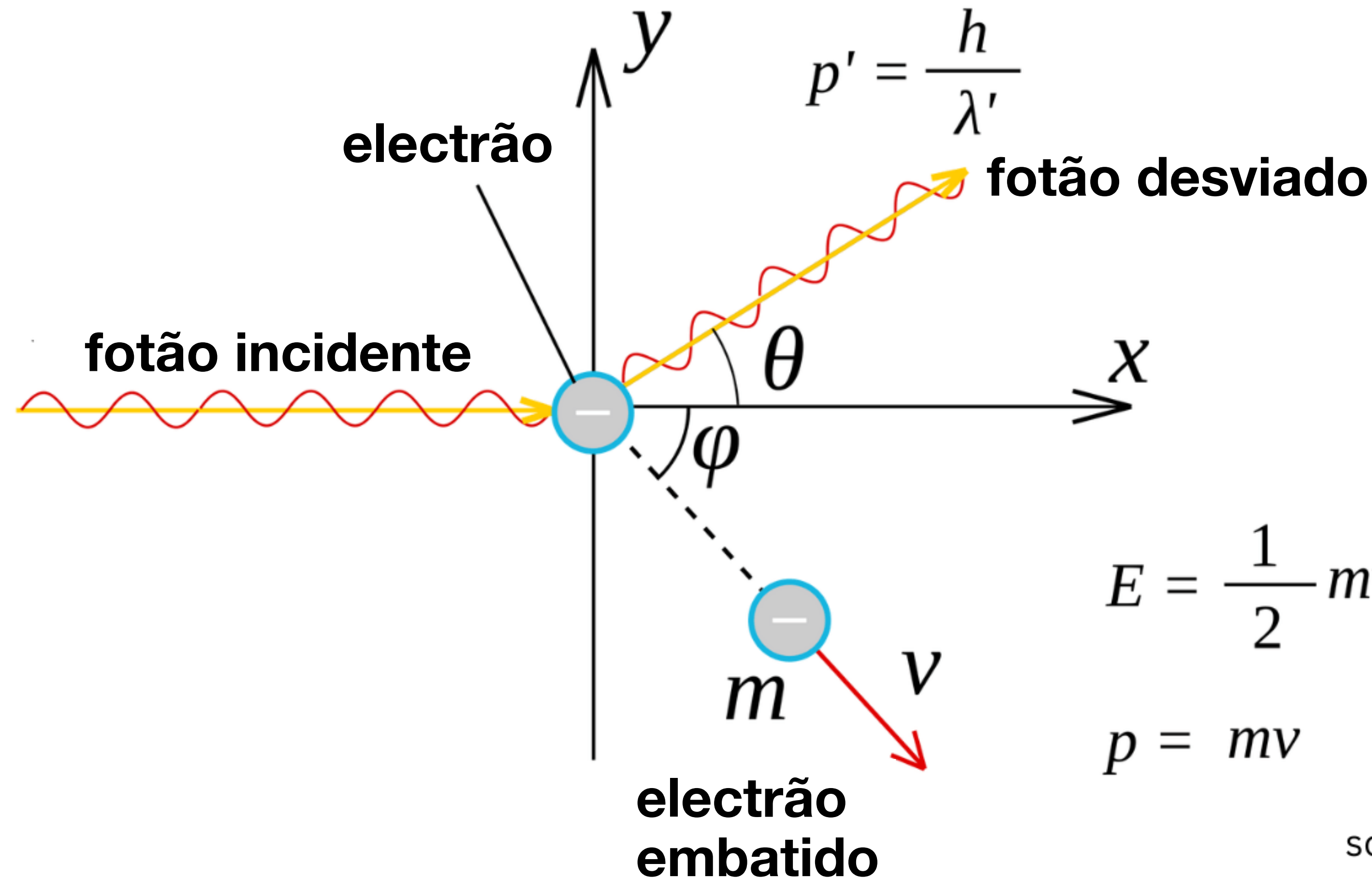
Efeito de Compton (efeito de desvio)

O desvio de Compton é o efeito onde um fóton de raio-X ou de raio gama aumenta o comprimento de onda (diminui a energia) depois de colisão inelástica com electrões.

$$\lambda' - \lambda = (h/mc)(1 - \cos \theta)$$

$$E' = \frac{hc}{\lambda'}$$

$$p' = \frac{h}{\lambda'}$$

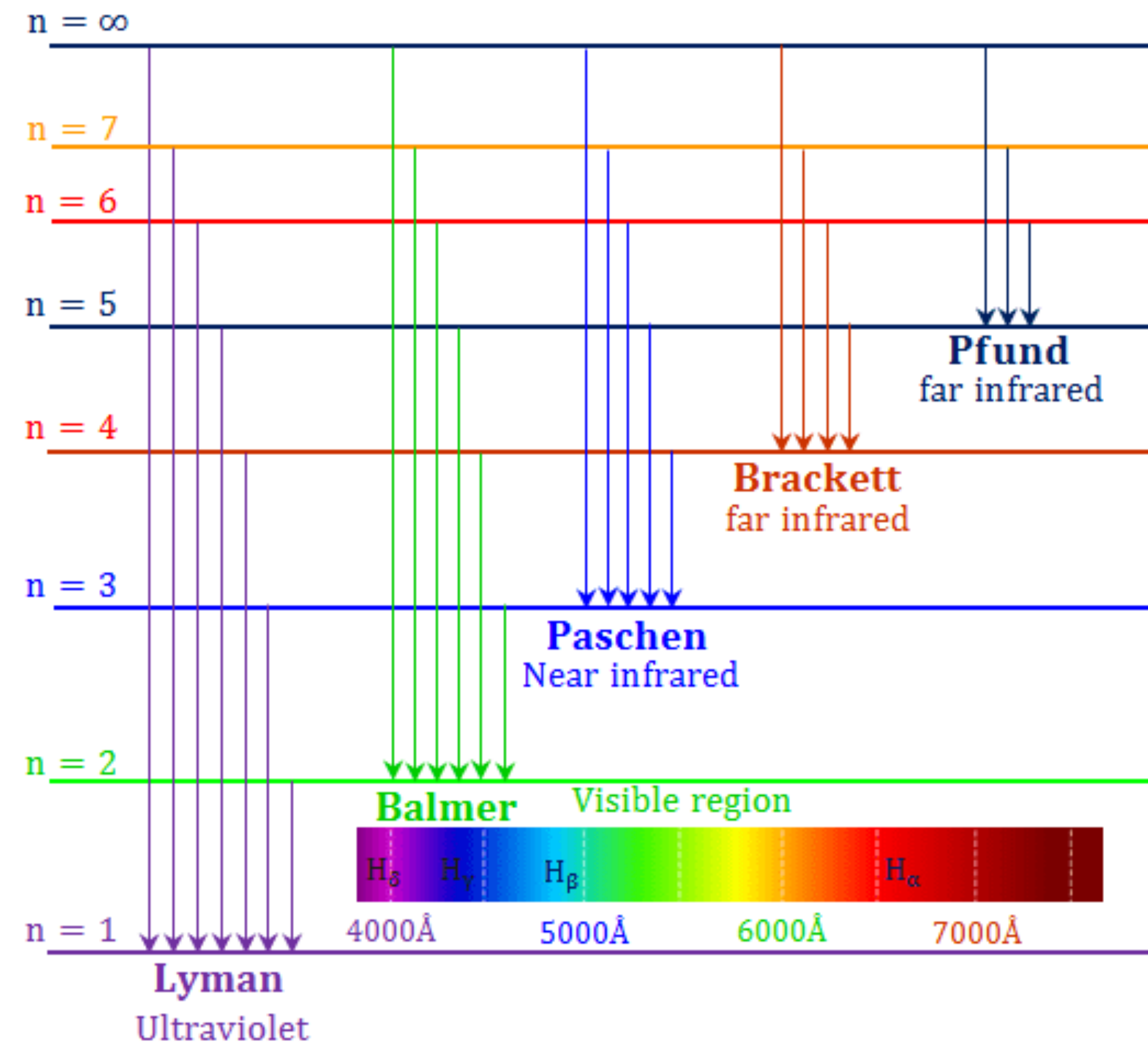


De volta à teoria atômica: o modelo de Bohr

Teoria atômica

O problema que ambos tentavam resolver

- No início do século XX, os físicos sabiam que os átomos emitiam luz — mas não luz de qualquer cor. Cada elemento emite luz apenas em comprimentos de onda muito precisos, formando um conjunto de linhas coloridas chamado espectro de emissão. O hidrogénio, por ser o átomo mais simples, tinha um espectro particularmente limpo: umas poucas linhas bem definidas no ultravioleta, no visível e no infravermelho.
- Ninguém conseguia explicar por que razão essas linhas apareciam exactamente onde apareciam. Era um dos grandes mistérios da física da época.



Espectro de emissão do Hidrogénio com nomes das séries.

O Modelo de Bohr (1913)

A ideia central

- Bohr propôs que o electrão do hidrogénio não pode orbitar o núcleo a qualquer distância — apenas a distâncias muito específicas, cada uma correspondendo a um nível de energia fixo. Fora dessas órbitas permitidas, o electrão simplesmente não pode existir.
- Imagina uma estante com n prateleiras. Um livro pode estar na primeira prateleira, na segunda, na terceira — mas não entre prateleiras. O electrão de Bohr é assim: só pode estar nas prateleiras, nunca no espaço entre elas. A cada prateleira corresponde um valor de n : $n = 1$ é a prateleira mais baixa (o nível mais próximo do núcleo), $n = 2$ a seguinte e assim por diante.

O Modelo de Bohr (1913)

Por que razão o electrão não cai em espiral para o núcleo?

- Esta era uma objecção séria. Pela física clássica, um electrão em órbita circular está continuamente a acelerar (a mudar de direcção) e uma carga acelerada irradia energia electromagnética. Se o electrão irradiasse energia continuamente, perderia velocidade e cairia em espiral para o núcleo em fracções de segundo — o átomo seria instável.
- Bohr simplesmente postulou que nas órbitas permitidas isso não acontece. O electrão orbita sem irradiar energia. Não havia justificação física profunda para isto — era uma regra imposta à força para que o modelo funcionasse. É uma das suas fragilidades fundamentais.

O Modelo de Bohr (1913)

Por que razão explica o espectro do hidrogénio?

- Quando o electrão salta de uma órbita para outra, a diferença de energia entre as duas órbitas não desaparece — é emitida sob a forma de um fóton. Como as órbitas têm energias fixas e bem determinadas, as diferenças entre elas também são fixas. Cada salto possível produz um fóton com uma energia muito precisa, que corresponde a um comprimento de onda muito preciso — ou seja, a uma linha muito precisa no espectro. Esta relação é expressa por $\Delta E = hf$, onde h é a constante de Planck e f é a frequência do fóton emitido ou absorvido.
- Por exemplo: quando o electrão cai de $n = 3$ para $n = 2$, emite um fóton de luz vermelha (656 nm) — é a linha mais proeminente do espectro visível do hidrogénio, chamada linha H- α . Quando cai de $n = 4$ para $n = 2$, emite luz azul-esverdeada. Quando cai de $n = 5$ para $n = 2$, emite violeta. Estas linhas formam a série de Balmer — as linhas do hidrogénio no espectro visível, que os espectroscopistas já conheciam empiricamente há décadas mas não conseguiam explicar.
- Bohr calculou os comprimentos de onda destas linhas a partir da sua hipótese e obteve valores que correspondiam exactamente às medições experimentais. Foi um triunfo extraordinário. O mesmo raciocínio aplica-se aos saltos para $n = 1$ (série de Lyman, no ultravioleta) e para $n = 3$ (série de Paschen, no infravermelho). Em todos os casos, as previsões de Bohr concordavam com a experiência.
- É de salientar uma vez mais que a absorção e a emissão são simétricas: se o electrão pode emitir um fóton de uma certa frequência ao descer de $n = 3$ para $n = 2$, então um fóton dessa mesma frequência pode ser absorvido para fazer o electrão subir de $n = 2$ para $n = 3$.

O Modelo de Bohr (1913)

As limitações

- Apesar do sucesso com o hidrogénio, o modelo de Bohr falha em aspectos fundamentais:
 - Para o Hélio (e elementos seguintes), sendo o Hélio o elemento mais simples depois do Hidrogénio, com apenas dois electrões — o modelo já não funciona. Não há forma de aplicar as suas regras a dois electrões a orbitar simultaneamente o mesmo núcleo e obter resultados correctos.
 - O modelo também não explicava por que razão algumas linhas espectrais são mais brilhantes do que outras — ou seja, por que razão alguns saltos são mais prováveis do que outros.
 - Não dava quaisquer explicações para a estrutura fina dos espectros, que só se vê com instrumentos de alta resolução.
 - E tinha um problema conceptual profundo: Bohr não justificava por que razão apenas certas órbitas são permitidas. Simplesmente declarava que era assim. Seria como dizer que a estante só teria certas prateleiras sem explicar por que razão as outras não existiam.

De volta à teoria atômica: o modelo de Schrödinger

O Modelo de Schrödinger (1926)

A ideia central

- Em 1924, Louis de Broglie propôs que os electrões — até então considerados puramente partículas — têm também natureza ondulatória. Tal como a luz se comporta ora como onda ora como partícula, o electrão também o faz. A cada electrão com momento linear p está associado um comprimento de onda $\lambda = h/p$.
- Schrödinger pegou nesta ideia e aplicou-a ao átomo: se o electrão é uma onda, então deve obedecer a uma equação de onda. Em 1926 escreveu essa equação — a equação de Schrödinger — e o que dela resulta transformaria completamente a imagem do átomo.

O Modelo de Schrödinger (1926)

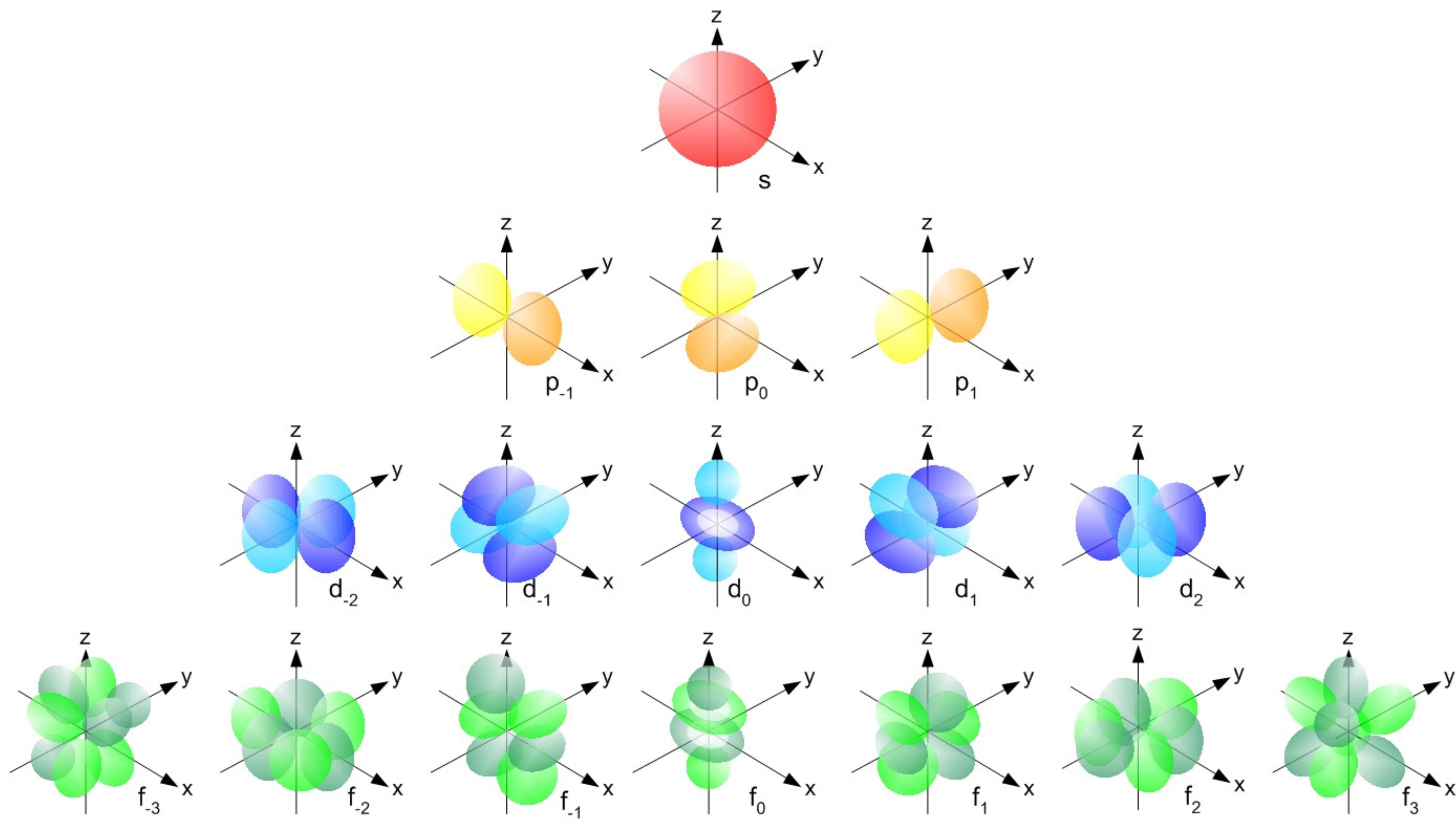
O electrão deixa de ter uma trajectória

- No modelo de Bohr, o electrão está num sítio preciso a cada instante — está na órbita $n = 2$, a tal distância do núcleo, a mover-se com tal velocidade. Tudo é determinado e calculável como na mecânica de Newton.
- No modelo de Schrödinger, isto desaparece completamente. O electrão não tem uma posição definida nem uma trajectória. O que existe é uma função de onda — uma função matemática, designada Ψ , que se estende pelo espaço e descreve o estado do electrão. O quadrado desta função, $|\Psi|^2$, diz-nos a probabilidade de encontrar o electrão em cada ponto do espaço se fizermos uma medição.
- O electrão existe, de certa forma, em todo o lado ao mesmo tempo — com probabilidades diferentes em sítios diferentes. Só quando é medido é que aparece numa posição concreta. Antes da medição, a pergunta «onde está o electrão?» não tem resposta. Não é que não saibamos — é que a própria natureza não determina isso.

O Modelo de Schrödinger (1926)

Os orbitais em vez de órbitas

- Em vez das órbitas circulares de Bohr, surgem os orbitais — regiões do espaço onde a probabilidade de encontrar o electrão é elevada. Convencionalmente, desenha-se a superfície que encerra 90% da probabilidade total.
- Os orbitais têm formas variadas, determinadas pelos quatro números quânticos:
 1. n — o número quântico principal, herdado de Bohr — determina o nível de energia e a distância média ao núcleo.
 2. ℓ — o número quântico azimutal — determina a forma do orbital. Para $\ell = 0$, o orbital é esférico (orbital s); para $\ell = 1$, tem dois lobos como um haltere (orbital p), existindo três destes orientados perpendicularmente no espaço; para $\ell = 2$, as formas tornam-se mais complexas (orbitais d); para $\ell = 3$, ainda mais (orbitais f) — ver a página seguinte para um exemplo gráfico.
 3. m_ℓ — o número quântico magnético — determina a orientação espacial do orbital.
 4. m_s — o número quântico de *spin* (momento angular intrínseco) — descreve uma propriedade intrínseca do electrão sem um equivalente clássico.
- Dois electrões com o mesmo n mas ℓ diferente têm formas completamente distintas de ocupar o espaço — algo que o modelo de Bohr não contemplava, porque nele n era suficiente para descrever tudo.



O Modelo de Schrödinger (1926)

Por que razão as órbitas de Bohr «funcionavam»?

- Quando se resolve a equação de Schrödinger para o hidrogénio, os níveis de energia permitidos são exactamente os mesmos que Bohr tinha calculado com os seus postulados. A quantização não precisa de ser imposta à força — emerge naturalmente da matemática da equação de onda.
- A causa profunda é esta: uma onda confinada num espaço fechado só pode existir com certas frequências — as frequências de ressonância. É o mesmo princípio que faz uma corda de guitarra vibrar apenas em certas frequências (a fundamental e as suas harmónicas). O electrão, sendo uma onda confinada à volta do núcleo, só pode ter certas energias. Bohr tinha chegado ao resultado certo, mas sem perceber a causa última.

O Modelo de Schrödinger (1926)

Limitações do modelo de Schrödinger

- Apesar do sucesso em relação ao modelo de Bohr, o modelo de Schrödinger também tem limitações fundamentais:
 - A interpretação probabilística é conceptualmente exigente e afasta-se radicalmente da intuição clássica.
 - Para átomos com muitos electrões e consequentes v_e elevadas, a equação só se resolve por métodos aproximados.
 - Não incorpora efeitos relativísticos — para isso é necessária a equação de Dirac.

O Modelo de Schrödinger (1926)

O que Schrödinger explica e Bohr não conseguia

- O modelo de Schrödinger explica correctamente os espectros de todos os átomos, não apenas do hidrogénio. Explica por que razão algumas transições são mais prováveis do que outras — porque a probabilidade de uma transição depende da sobreposição das funções de onda dos dois estados, e isso é calculável. Explica a estrutura fina dos espectros, que resulta de efeitos subtis como o spin do electrão e as interacções magnéticas internas do átomo.
- Mas sobretudo, fornece a base para compreender como os átomos se ligam para formar moléculas — algo que o modelo de Bohr nunca poderia fazer, porque a geometria das ligações químicas depende directamente das formas dos orbitais.

A equação de Dirac

A equação de Dirac

Expansão relativística da equação de Schrödinger

- É a versão relativística da equação de Schrödinger, formulada por Paul Dirac em 1928.
- O problema era este: a equação de Schrödinger funciona muito bem para electrões lentos, mas quando os electrões se movem a velocidades próximas da da luz — o que acontece nos átomos pesados, onde o campo eléctrico do núcleo é enorme — é necessário incorporar a relatividade especial de Einstein. A equação de Schrödinger não o faz.

A equação de Dirac

Sucessos

- Dirac conseguiu escrever uma equação que satisfazia simultaneamente os princípios da mecânica quântica e os da relatividade especial. Isso foi tecnicamente muito difícil, porque as duas hipóteses tinham estruturas matemáticas muito diferentes e aparentemente incompatíveis.
- O resultado foi surpreendente por duas razões:
 1. O *spin* deixou de ser algo introduzido à mão como grau de liberdade extra. No modelo de Schrödinger, o *spin* do electrão — o quarto número quântico, m_s — tinha que ser introduzido manualmente, como um facto experimental sem justificação teórica profunda. Na equação de Dirac, o spin emerge naturalmente da matemática. Não é um postulado — é uma consequência inevitável de combinar a quântica com a relatividade.
 2. Previu a antimatéria (!). A equação de Dirac tem duas famílias de soluções: uma para o electrão normal, e outra para uma partícula com a mesma massa mas carga oposta. Dirac inicialmente não sabia o que fazer com essas soluções opostas — eram matematicamente inevitáveis mas não correspondiam a nada conhecido. Em 1932, Carl Anderson descobriu experimentalmente essa partícula: o positrão, a antipartícula do electrão. Foi a primeira vez na história que uma entidade física foi prevista teoricamente antes de ser observada experimentalmente.
- A equação de Dirac é, por isso, o ponto de partida da **física de partículas moderna**.

Aspecto	Bohr (1913)	Schrödinger (1926)
Base teórica	Mecânica clássica e postulados <i>ad hoc</i>	Mecânica quântica rigorosa
Trajectória do electrão	Órbita circular definida	Inexistente — apenas probabilidades
Descrição matemática	Raios e energias discretos	Função de onda Ψ
Localização do electrão	Exacta (na órbita)	Probabilística (orbital)
Aplicabilidade	Só o Hidrogénio	Todos os átomos
Números quânticos	Apenas n	n, ℓ, m_ℓ, m_s
Natureza do electrão	Partícula	Onda e partícula (dualidade)
Espectros explicados	Hidrogénio (linhas principais)	Todos, incluindo estrutura fina

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \\ \psi_3 \\ \psi_4 \end{pmatrix}$$

ψ_1, ψ_2 espinor superior — electrão com *spin* $\uparrow$ e $\downarrow$

ψ_3, ψ_4 espinor inferior — estados de energia negativa $\rightarrow$ antimatéria (positrão)

- No limite de baixas velocidades ($\psi_3, \psi_4 \approx 0$), a equação de Dirac reduz-se à equação de Pauli, que é a equação de Schrödinger com *spin* incluído — confirmando que Schrödinger é apenas um caso particular.
- A grande beleza da construção de Dirac está precisamente aqui: ao exigir apenas consistência matemática com a relatividade, o spin e a antimatéria surgem naturalmente sem qualquer hipótese adicional.

Em síntese

coda

- Bohr fez algo notável: com raciocínio físico audacioso e alguns postulados sem justificação formal profunda, conseguiu explicar o espectro do hidrogénio com exactidão extraordinária. Foi o primeiro modelo a atribuir a quantização para explicar o interior do átomo e abriu caminho para tudo o que se seguiu. Contudo, era fundamentalmente híbrido e inconsistente: misturava a mecânica da física clássica com postulados quânticos sem grande justificação formal.
- Schrödinger completou a revolução. Mostrou que a quantização não é uma regra arbitrária mas uma consequência inevitável da natureza ondulatória do electrão. Eliminou as trajectórias, substituiu a certeza pela probabilidade (o determinista pelo estocástico), e construiu uma hipótese que descreve correctamente não só o hidrogénio mas toda a tabela periódica — e com ela, em princípio, toda a química.
- A diferença fundamental entre os dois foi esta: Bohr perguntou onde está o electrão e respondeu com uma órbita. Schrödinger percebeu que essa pergunta, nos termos em que estava formulada, não tem resposta — e construiu uma hipótese para descrever não onde o electrão está, mas onde é provável que esteja.

Anti-matéria (desvio interessante)

Anti-matéria

O que é?

- A antimatéria não é ficção científica — é uma realidade experimental, prevista pela matemática antes de ser detectada em laboratório, e presente em fenómenos naturais que ocorrem mesmo dentro do corpo humano.
- Para compreender a antimatéria, é preciso primeiro compreender o que define uma partícula. Cada partícula tem um conjunto de propriedades internas: massa, carga eléctrica, spin e números quânticos como o número bariónico e o número leptónico. O electrão, por exemplo, tem carga -1 , massa de cerca de $0,511 \text{ MeV}/c^2$, spin $\frac{1}{2}$ e número leptónico $+1$. O protão tem carga $+1$, massa de $938,3 \text{ MeV}/c^2$, spin $\frac{1}{2}$ e número bariónico $+1$. O neutrão tem carga nula, massa ligeiramente superior à do protão, spin $\frac{1}{2}$ e número bariónico $+1$.
- A antimatéria define-se de forma precisa: a antipartícula de uma dada partícula tem exactamente a mesma massa e o mesmo spin, mas todos os números quânticos internos invertidos. O antielectrão — chamado positrão — tem carga $+1$ e número leptónico -1 . O antiprotão tem carga -1 e número bariónico -1 . O antineutrão tem carga nula, tal como o neutrão, mas número bariónico -1 — o que prova que a antimatéria não é definida pela carga eléctrica, mas pela inversão de todos os números quânticos internos.

Anti-matéria

Prever antes de conhecer

- A previsão da antimatéria não nasceu de observação experimental, mas de uma equação teórica. Em 1928, o físico britânico Paul Dirac tentou formular uma equação quântica compatível com a teoria da relatividade restrita de Einstein. A equação de Schrödinger, que descrevia o comportamento quântico das partículas, não era relativista — funcionava bem a baixas velocidades, mas falhava quando as partículas se moviam próximo da velocidade da luz. Dirac construiu uma nova equação, de primeira ordem no tempo e no espaço, que respeitava a relação relativista entre energia e momento: $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$.
- Para que a equação fosse matematicamente consistente, Dirac descobriu que a função de onda — o objecto matemático que descreve o estado quântico da partícula — não podia ser um simples número escalar. Tinha de ser um objecto com quatro componentes, objecto esse que se transforma de uma forma especial sob rotações e que hoje se chama *espinor*. Um espinor não é um vector comum: enquanto um vector regressa ao estado original após uma rotação de 360° , um espinor muda de sinal, e só regressa ao estado original após 720° . Esta propriedade é a manifestação matemática do spin $\frac{1}{2}$ e emerge naturalmente da estrutura da equação, sem ser imposta como hipótese adicional.

Anti-matéria

Prever antes de conhecer

- As quatro componentes do espinor de Dirac têm um significado físico directo: duas descrevem a partícula com *spin* para cima e para baixo, e as outras duas descrevem estados de energia negativa. Dirac interpretou esses estados como uma segunda partícula com as mesmas propriedades mas carga oposta — a antipartícula.
- O positrão foi detectado **experimentalmente** por Carl Anderson em 1932, confirmando a previsão teórica. Em 1955, Owen Chamberlain e Emilio Segrè detectaram o antiprotão no acelerador Bevatron do Lawrence Berkeley Laboratory, o que lhes valeu o Prémio Nobel de Física em 1959. O antineutrão foi detectado um ano depois, em 1956, por Bruce Cork e colaboradores no mesmo acelerador.
- O antineutrão merece atenção especial porque desafia a intuição. Se tem carga nula, em que difere do neutrão? A diferença está nos quarks que o constituem. O neutrão é composto por 1 (um) *quark up* e 2 (dois) *quarks down* (udd); o antineutrão é composto pelos respectivos antiquarks ($\bar{u}\bar{d}\bar{d}$). Ambos têm carga eléctrica nula — mas os momentos magnéticos são opostos em sinal, e os números bariónicos são $+1$ e -1 , respectivamente. São partículas distintas.

Anti-matéria

A aniquilação total

- O que acontece quando matéria e antimatéria se encontram é talvez o fenómeno mais energético que a física conhece: a **aniquilação total**. Quando um electrão encontra um positrão, ambos desaparecem e a sua massa é convertida integralmente em dois fotões gama emitidos em direcções opostas, cada um com energia de 511 keV. Este processo é descrito por $E = mc^2$ na sua forma mais literal — **100% da massa converte-se em energia (!)**. A título de comparação, a fusão nuclear converte apenas cerca de 0,7% da massa em energia, e os explosivos químicos menos de 0,001%.
- No caso dos barões — protões, neutrões e as suas antipartículas — a aniquilação é mais complexa porque intervém a força forte. Os quarks e antiquarks não se aniquilam directamente em fotões: recombina-se primeiro em mesões chamados píões, que por sua vez se desintegram em fotões, muões e neutrinos. O processo passa por várias etapas, mas o resultado final é o mesmo: a massa total converte-se em radiação e nenhuma partícula bariónica sobrevive.
- A aniquilação não viola nenhuma lei de conservação — pelo contrário, respeita todas simultaneamente:
 1. A energia total conserva-se, com a massa a converter-se na energia cinética dos produtos.
 2. O momento linear conserva-se, com os fotões a serem emitidos simetricamente.
 3. A carga eléctrica conserva-se, porque partícula e antipartícula têm cargas opostas que somam zero.
 4. O número bariónico e o número leptónico conservam-se pela mesma razão declarada em 3..

Anti-matéria

Produção

- A produção artificial de antimatéria é extraordinariamente difícil. A quantidade total produzida pela humanidade ao longo de toda a história da ciência não passa de alguns nanogramas. Em 1999, a NASA estimou o custo de produção de um grama de antihidrogénio em 62,5 biliões de dólares (122,0 biliões de dólares em 2026). Em termos de estrutura, o núcleo de antimatéria mais complexo alguma vez produzido foi detectado em 2024 no acelerador RHIC do Brookhaven National Laboratory: o antihiperhidrogénio-4, composto por um antiprotão, dois antineutrões e um antihiperão, detectado após a análise de seis mil milhões de colisões de iões de ouro.
- A antimatéria levanta também uma das questões mais profundas da cosmologia moderna. Se o Big Bang produziu energia pura que se converteu em partículas, as leis da física prevêem que deveria ter criado quantidades iguais de matéria e antimatéria. Essas quantidades deveriam ter-se aniquilado mutuamente, deixando um universo de pura radiação, sem átomos, sem estrelas, sem nada. O facto de existirmos — de o universo ser feito de matéria — implica que houve uma ligeira assimetria na quantidade produzida de cada uma: cerca de um protão extra por cada mil milhões de pares matéria-antimatéria. Esta assimetria chama-se **violação de CP** (a simetria da **c**ombinação e da **p**aridade de partículas é violada) e é um dos problemas não resolvidos da física teórica moderna. Sabe-se que existe e já foi observada experimentalmente em certas desintegrações de partículas, mas a sua magnitude medida em laboratório ainda não é suficiente para explicar a predominância de matéria que observamos no universo.

Anti-matéria

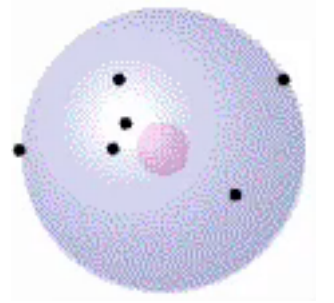
adoc

- A antimatéria não é portanto uma curiosidade abstracta. É a consequência directa de se levar a sério e combinar concomitantemente a mecânica quântica e a relatividade. Cada vez que um médico utiliza uma tomografia PET (*Positron Emission Tomography*) para diagnosticar um tumor — um exame que funciona precisamente porque certos átomos emitem positrões que se aniquilam com electrões do tecido humano — está a usar antimatéria.
- A equação de Dirac, escrita em 1928, ainda não terminou de dar os seus frutos.

Estrutura nuclear, isótopos e radioatividade

Estrutura nuclear

Percebendo os electrões

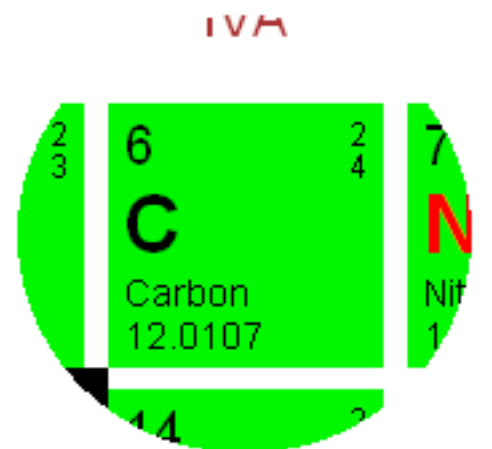


- Quando se aquece um gás de hidrogénio até emitir luz e se passa essa luz por um prisma, não se obtém um arco-íris contínuo como o da luz solar — obtém-se um conjunto de riscas coloridas bem definidas, separadas por escuridão. Cada elemento químico produz um padrão de riscas único, uma espécie de impressão digital luminosa. Este fenómeno chama-se espectro de emissão, e a sua explicação exigiu uma revolução completa na física.
- No século XIX sabia-se que o hidrogénio emitia riscas em posições muito precisas, e Johann Balmer descobriu em 1885 uma fórmula empírica que as descrevia com exactidão surpreendente. Mas ninguém sabia porquê. A física clássica previa que um electrão a orbitar um núcleo deveria irradiar energia continuamente, em espiral, e colapsar sobre o núcleo em fracções de segundo — o que evidentemente não acontece, pois os átomos são estáveis.
- Em 1913, Niels Bohr propôs um modelo que quebrava com a física clássica de forma deliberada, mas disto já falámos.

Estrutura nuclear

O núcleo e os elementos

- Passando da nuvem electrónica para o interior do átomo, encontramos o núcleo — uma região extraordinariamente pequena (da ordem de 10^{-15} m, cem mil vezes menor que o átomo) onde se concentra praticamente toda a massa. O núcleo é constituído por protões e neutrões, designados colectivamente por nucleões. O número de protões chama-se número atómico e representa-se por Z ; define o elemento químico. O número total de nucleões chama-se número de massa e representa-se por A . O número de neutrões é portanto $N = A - Z$.
- A notação padrão para um núcleo é:
- ${}^A_Z X$
- onde X é o símbolo do elemento. Por exemplo, ${}^{12}_6\text{C}$ representa o carbono-12, com 6 protões e 6 neutrões.



Isótopos

Versões do mesmo

- Os isótopos são átomos do mesmo elemento — portanto com o mesmo Z — mas com número de massa diferente, ou seja, com número de neutrões diferente. O hidrogénio tem três isótopos: o hidrogénio comum (^1H , um protão, zero neutrões), o deutério (^2H , um protão, um neutrão) e o trítio (^3H , um protão, dois neutrões). O carbono natural é uma mistura de carbono-12 (98,9%) e carbono-13 (1,1%), com traços de carbono-14. Quimicamente, os isótopos de um elemento comportam-se de forma praticamente idêntica — têm os mesmos electrões e portanto as mesmas propriedades químicas — mas têm massas diferentes e, crucialmente, podem ter *estabilidades* nucleares muito diferentes.

Radioactividade

Tamanho e estabilidade

- A estabilidade do núcleo depende do equilíbrio entre a força electrostática de repulsão entre os prótons (que tende a desintegrar o núcleo) e a força nuclear forte, de curto alcance, que atrai os nucleões entre si. Para núcleos leves, a estabilidade máxima ocorre quando $Z \approx N$, ou seja, quando há aproximadamente igual número de prótons e neutrões. Para núcleos mais pesados, são necessários progressivamente mais neutrões do que prótons para compensar a crescente repulsão electrostática. A partir de certo ponto, nenhuma combinação é completamente estável — todos os núcleos com $Z > 82$ (Pb, chumbo) são **radioactivos**.

Radioatividade

O que é?

- A radioatividade é o processo pelo qual um núcleo instável se transforma espontaneamente, emitindo radiação, para atingir uma configuração mais estável. Existem três tipos principais de desintegração, com naturezas fisicamente distintas.

Radioactividade

alfa, beta e gama

- A desintegração **alfa** consiste na emissão de uma partícula alfa, que é um núcleo de hélio-4 (dois prótons e dois neutrões). O núcleo pai perde dois prótons e dois neutrões, transformando-se num núcleo filho com Z diminuído de 2 e A diminuído de 4. Por exemplo, o urânio-238 emite uma partícula alfa e transforma-se em tório-234. As partículas alfa têm poder de penetração baixo — são travadas por uma folha de papel ou pela pele — mas são muito ionizantes, o que as torna perigosas se a fonte radioactiva for inalada ou ingerida.
- A desintegração **beta** ocorre de duas formas. Na desintegração beta menos (β^-), um neutrão converte-se em próton, emitindo um electrão e um antineutrino electrónico. O número atómico aumenta de 1, o número de massa mantém-se. Na desintegração beta mais (β^+), um próton converte-se em neutrão, emitindo um positrão e um neutrino electrónico. O número atómico diminui de 1, o número de massa mantém-se. A emissão de β^- ocorre em núcleos com excesso de neutrões; a de β^+ em núcleos com excesso de prótons. As partículas beta têm poder de penetração intermédio — são travadas por alguns milímetros de alumínio.
- A desintegração **gama** não altera o número de prótons nem de neutrões — não há transmutação de elemento. Ocorre quando um núcleo em estado excitado passa para um estado de menor energia, emitindo um fóton de alta energia chamado raio gama. Frequentemente acompanha as desintegrações alfa e beta, porque o núcleo filho pode ficar em estado excitado após a emissão. Os raios gama têm enorme poder de penetração e requerem chumbo ou betão espesso para serem absorvidos e parados.

Radioatividade

Lei de desintegração radioactiva

- A lei de desintegração radioactiva é de natureza estatística: não é possível prever quando um determinado núcleo se vai desintegrar, mas para um conjunto muito grande de núcleos a taxa de desintegração é proporcional ao número de núcleos presentes:
- $N(t) = N_0 e^{(-\lambda t)}$
- onde N_0 é o número inicial de núcleos, λ é a constante de desintegração (característica de cada isótopo), e t é o tempo. Desta lei resulta o conceito de período de semi-desintegração $T_{1/2}$ — o tempo necessário para que metade dos núcleos se desintegre — dado por:
- $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 0,693 / \lambda$

Radioatividade

Estabilidade temporal

- Os períodos de semi-desintegração variam de forma extraordinária entre isótopos:
 - o polónio-214 tem $T_{1/2}$ de 164 microsegundos;
 - o urânio-238 tem $T_{1/2}$ de 4,5 mil milhões de anos, comparável à idade do sistema solar.
- Esta variação é usada na datação radiométrica — o carbono-14, com $T_{1/2}$ de 5730 anos, permite datar materiais orgânicos até cerca de 50 000 anos; o urânio-238 e outros isótopos de longa duração permitem datar rochas e meteoritos com idades de milhares de milhões de anos.

Radioactividade

Usos e aplicações

- A actividade de uma fonte radioactiva (o número de desintegrações por segundo) mede-se em becquerel (Bq), onde 1 Bq corresponde a uma desintegração por segundo. A dose de radiação absorvida pelo corpo humano mede-se em gray (Gy), e o efeito biológico equivalente em sievert (Sv), que pondera o tipo de radiação pelo dano que causa nos tecidos.
- A radioactividade não é apenas uma ameaça a gerir; é também uma ferramenta. Na medicina nuclear, isótopos como o tecnécio-99m ($T_{1/2} = 6$ horas) são utilizados em imagiologia diagnóstica. O iodo-131 é usado no tratamento de cancro da tiróide. Na indústria, a radiografia com raios gama detecta defeitos em estruturas metálicas. Na investigação científica, os isótopos radioactivos funcionam como marcadores que permitem seguir reacções químicas e biológicas com precisão que nenhum outro método consegue igualar.

Radioactividade

O sievert

- Em termos de grandezas práticas, o milisievert (mSv, um milésimo de sievert) e o microsievert (μ Sv, um milionésimo de sievert) são as unidades quotidianas. A dose de radiação de fundo natural a que um ser humano está exposto em Portugal é de aproximadamente 2 a 3 mSv por ano, proveniente de várias fontes: a radiação cósmica (mais intensa em altitude, razão pela qual uma viagem de avião Lisboa-Nova Iorque implica uma dose de cerca de 0,05 a 0,1 mSv), o radão — um gás radioactivo de origem natural que se acumula em edifícios, especialmente nas caves e particularmente em zonas graníticas — e a radiação proveniente de materiais de construção e do solo.
- Uma radiografia ao tórax implica uma dose eficaz de aproximadamente 0,02 mSv. Uma tomografia computadorizada abdominal implica cerca de 8 a 10 mSv. Uma mamografia cerca de 0,4 mSv. Estes valores são considerados aceitáveis no contexto clínico porque o benefício diagnóstico supera amplamente o risco radiológico.
- Os limites de dose estabelecidos pela ICRP para trabalhadores expostos profissionalmente à radiação — técnicos de radiologia, operadores de centrais nucleares, investigadores — são de 20 mSv por ano em média ao longo de cinco anos, com um máximo de 50 mSv em qualquer ano isolado. Para o público em geral, o limite é de 1 mSv por ano acima da radiação de fundo natural.

Conclusão

Conclusão

O modernismo dos quanta

- A compreensão dos espectros atômicos e da estrutura nuclear são, em conjunto, a base sobre a qual assenta *toda a física e química modernas* — desde os lasers à ressonância magnética, desde a datação de fósseis à produção de energia nuclear. O fio condutor entre estes dois domínios é a mesma ideia: a energia nos sistemas não é contínua, mas discreta — quântica, e esta descontinuidade tem consequências que se manifestam a todas as escalas, do electrão ao núcleo ao universo observável.