

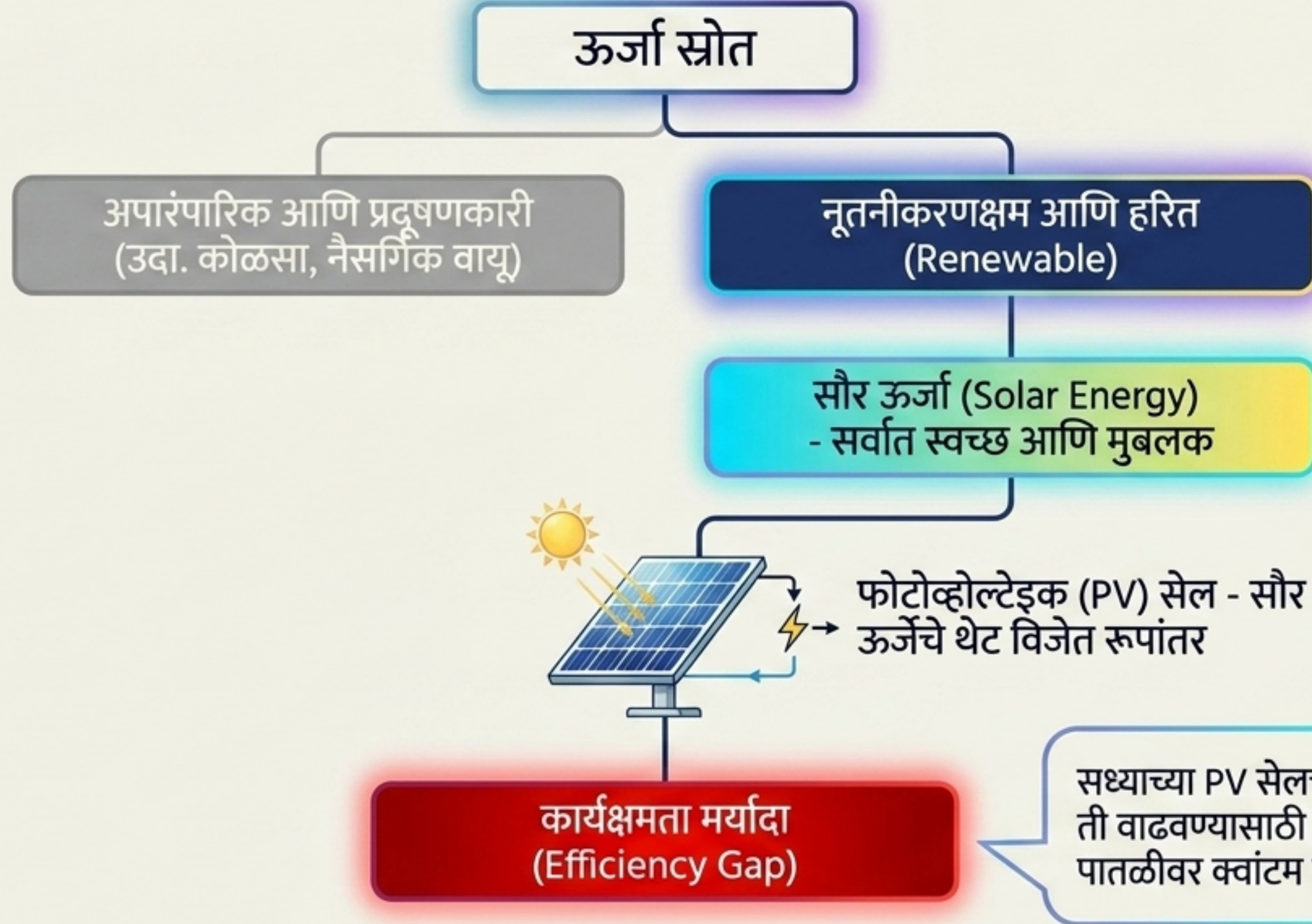
Introduction to Quantum Mechanics in Solar PV | सौर फोटोव्होल्टेइकमध्ये क्वांटम मेकॅनिक्सचा परिचय

- ऊर्जा निर्मितीच्या क्षेत्रात सौर ऊर्जा हा एक अत्यंत महत्वाचा आणि स्वच्छ स्रोत आहे.
- आधुनिक सौर सेलची (Solar Cell) कार्यक्षमता समजून घेण्यासाठी क्वांटम मेकॅनिक्स आवश्यक आहे.
- पारंपारिक भौतिकशास्त्र (Classical Physics) अतिसूक्ष्म कणांचे वर्तन स्पष्ट करू शकत नाही.
- या सादरीकरणात आपण स्थूल (Macro) जगाकडून सूक्ष्म (Micro) जगाकडे जाणार आहोत.
- प्रकाशाचे दुहेरी स्वरूप (कण आणि तरंग) आपण सोप्या उदाहरणांनी समजून घेऊ.
- हे ज्ञान सोलर पॅनेलची कार्यक्षमता वाढवण्यासाठी कसे वापरले जाते हे आपण पाहू.

Learning Objectives | अभ्यासाची उद्दिष्टे



The Need for Solar PV | सौर ऊर्जेची गरज आणि महत्त्व



The Macro vs. Micro Scale | स्थूल विरुद्ध सूक्ष्म प्रमाण (खडूचे उदाहरण)



सामान्य खडू (Bulk Chalk)

- १० न्यूटन (N) बलाने फेकल्यावर न्यूटनच्या नियमांचा वापर करून आपण खडूचा वेग आणि अचूक अंतर सांगू शकतो.
- पारंपारिक भौतिकशास्त्र येथे १००% लागू होते.



नॅनो खडू (Nano-Chalk - 10^{-9} मीटर)

- या अतिसूक्ष्म खडूवर तेच बल लावले, तरी त्याचे अचूक अंतर किंवा दिशा आपण सांगू शकत नाही.
- न्यूटनचे नियम चुकीचे नाहीत, तर कणांचा अतिसूक्ष्म आकार (Scale) हे नियम वापरण्यास मज्जाव करतो.

The Failure of Classical Physics | शास्त्रीय भौतिकशास्त्राचे अपयश

रुदरफोर्डचे मॉडेल

अणूच्या मध्यभागी धन प्रभारित केंद्रक (Nucleus) असते आणि इलेक्ट्रॉन त्याच्याभोवती फिरतात.

The Collapsing Atom Diagram



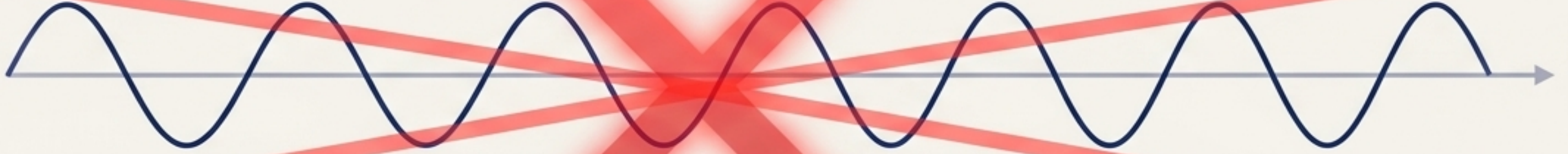
मॅक्सवेलचा सिद्धांत

कोणताही प्रवेगक (Accelerating) चार्ज ऊर्जा गमावतो. इलेक्ट्रॉन कक्षेत फिरताना दिशा बदलतो, म्हणजेच तो प्रवेगक असतो.

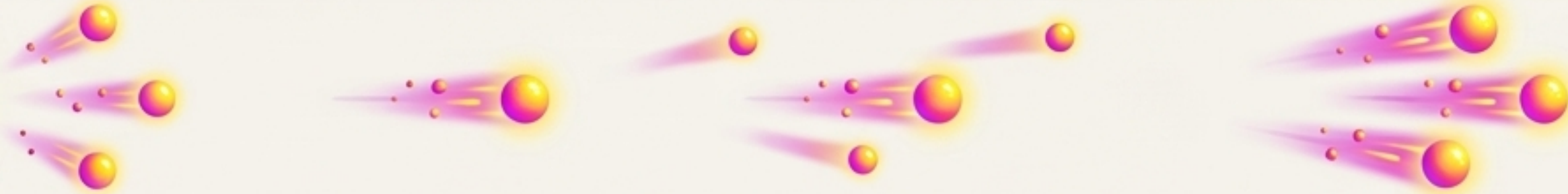
अणूचा विनाश (अशक्य परिणाम)

जर इलेक्ट्रॉनने ऊर्जा गमावली, तर तो सर्पिलाकार मार्गाने जाऊन थेट केंद्रकावर आदळेला. अणूचे अस्तित्वच नष्ट व्हायला हवे, पण प्रत्यक्षात अणू स्थिर आहेत. याशिवाय हे मॉडेल स्पेक्ट्रममधील रेषा (Line Spectrum) स्पष्ट करू शकले नाही.

The Birth of Quantum Mechanics | क्वांटम मेकॅनिक्सचा जन्म



पारंपारिक समज: प्रकाश हा एक सलग तरंग (Continuous Wave) आहे.



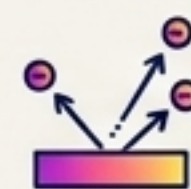
आइनस्टाइन आणि प्लँकचा सिद्धांत: गरम वस्तू ऊर्जा सतत नाही, तर 'बंडल' स्वरूपात उत्सर्जित करते.



ऊर्जेच्या या लहान बंडलला किंवा पॅकेटला आइनस्टाइन यांनी 'फोटॉन' (Photon) असे नाव दिले.



प्रकाश हा केवळ एक तरंग नसून तो फोटॉन नावाच्या कणांचा (Particles) बनलेला आहे.

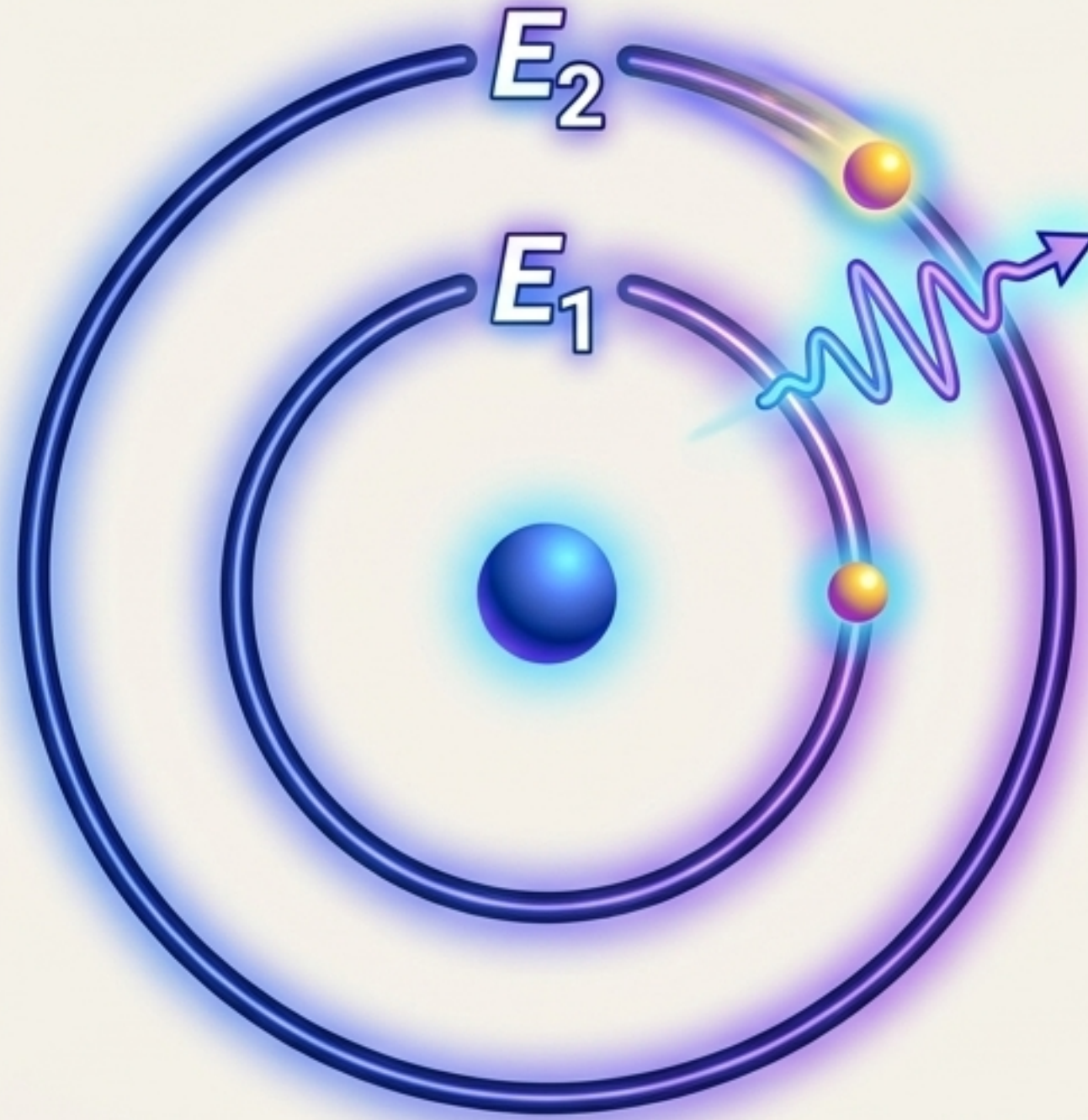


या संकल्पनेमुळे फोटोइलेक्ट्रिक इफेक्ट आणि कॉम्प्टन इफेक्ट यशस्वीरीत्या स्पष्ट करता आले.

Bohr's Atomic Model | बोहरचे अणू मॉडेल

निश्चित कक्षा (Fixed Orbits)

- बोहर यांच्या मते, इलेक्ट्रॉन अणूमध्ये कोणत्याही यादृच्छिक (Arbitrary) कक्षेत फिरू शकत नाहीत.
- इलेक्ट्रॉन केवळ ठराविक आणि निश्चित ऊर्जा असलेल्या विशिष्ट कक्षांमध्येच (Orbits) फिरू शकतात.
- जोपर्यंत इलेक्ट्रॉन एका निश्चित कक्षेत आहे, तोपर्यंत तो आपली ऊर्जा गमावत नाही.

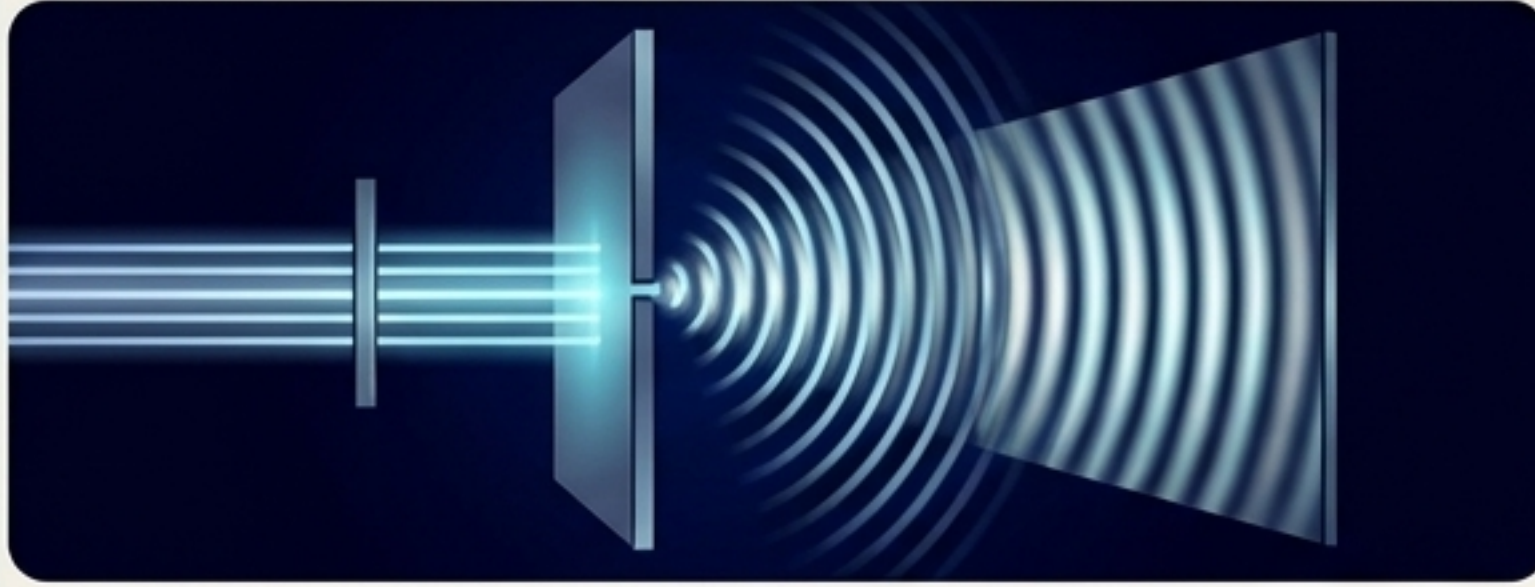


क्वांटम उडी (Quantum Jump)

- जेव्हा इलेक्ट्रॉन एका कक्षेतून दुसऱ्या कक्षेत उडी मारतो, तेव्हाच तो ऊर्जेचे उत्सर्जन किंवा शोषण करतो.
- या स्पष्टीकरणामुळे अणूची स्थिरता आणि लाईन स्पेक्ट्रम या दोन्ही समस्या पूर्णपणे सुटल्या.

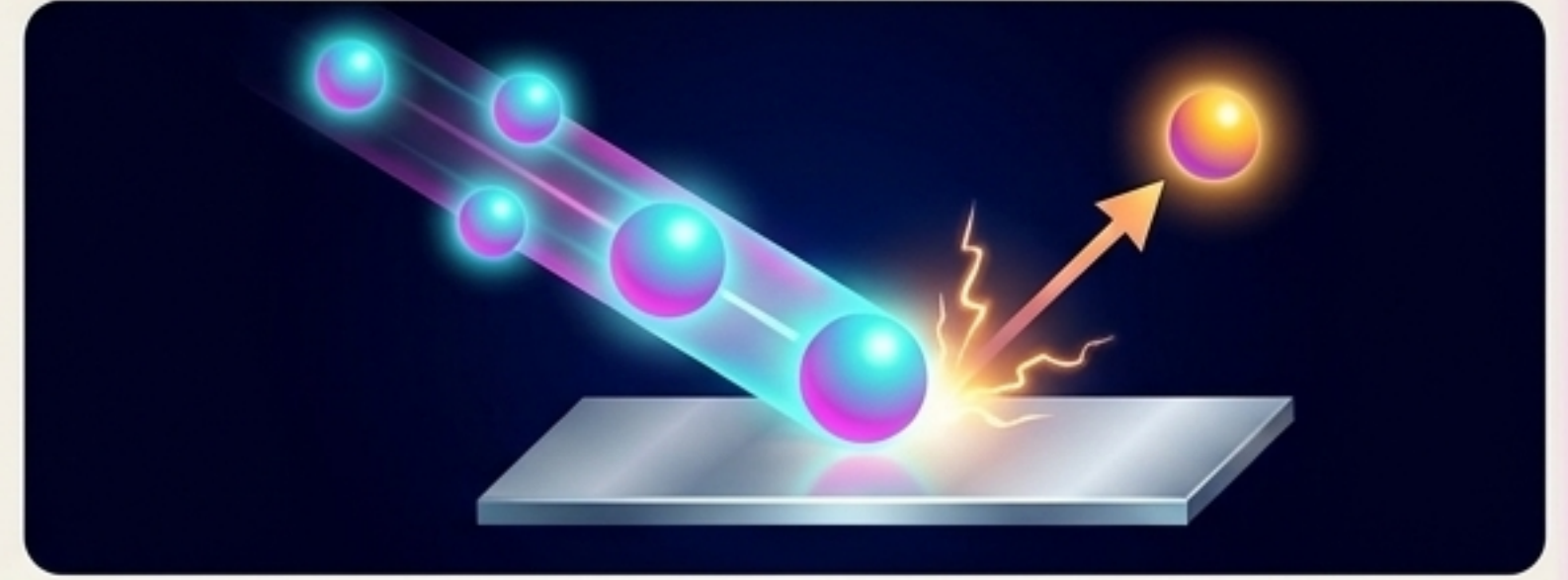
Wave-Particle Duality (Light) | प्रकाशाचे दुहेरी स्वरूप (तरंग आणि कण)

प्रकाश तरंग म्हणून (Light as a Wave)



- जेव्हा आपण ध्रुवीकरण (Polarization) किंवा विवर्तन (Diffraction) यांसारख्या घटनांचा अभ्यास करतो, तेव्हा प्रकाश तरंग मानला जातो.
- प्रकाश हा अवकाशात पसरणारा तरंग आहे.

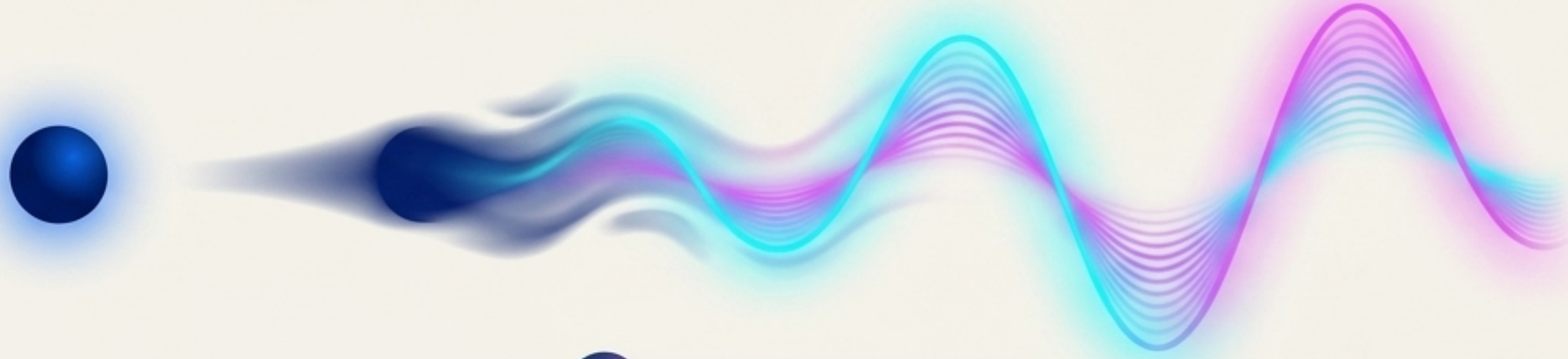
प्रकाश कण म्हणून (Light as a Particle)



- फोटोइलेक्ट्रिक इफेक्ट किंवा कॉम्प्टन इफेक्ट समजून घेण्यासाठी प्रकाश कण (फोटॉन) मानला जातो.
- प्रकाश हा ऊर्जा असलेल्या कणांचा प्रवाह आहे.

दुहेरी स्वरूप (Dual Nature): प्रकाश दोन्ही रूपांत अस्तित्वात असू शकतो. यातूनच वैज्ञानिकांच्या मनात एक नवीन प्रश्न निर्माण झाला – जर प्रकाश कणासारखा वागू शकतो, तर कण तरंगासारखे वागू शकतील का?

De Broglie Wavelength | डी ब्रॉग्ली तरंगलांबी आणि मॅटर वेव्ह



1

तरंगलांबी (Wave Nature):
लुईस डी ब्रॉग्ली यांनी मांडले की
इलेक्ट्रॉनसारखे कणदेखील
तरंगासारखे वागू शकतात.
याला 'मॅटर वेव्ह' म्हणतात.

2

प्लँकचा स्थिरांक
(Planck's Constant)

$$\lambda = h/p$$

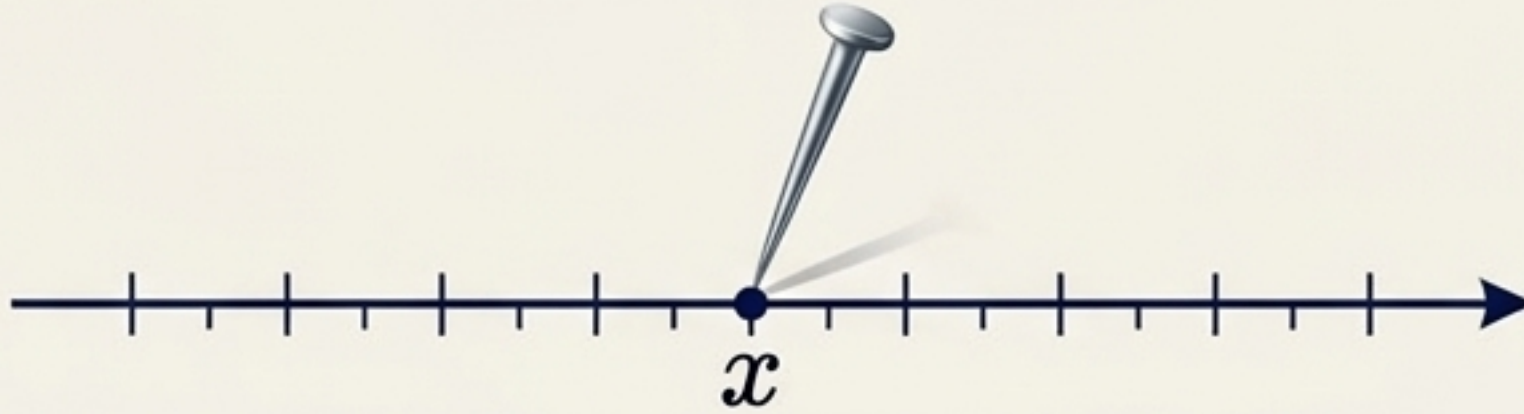
3

मोमेंटम (Particle Nature):
जर आपल्याला इलेक्ट्रॉनचा
वस्तुमान आणि वेग माहीत
असेल, तर आपण त्याची
तरंगलांबी काढू शकतो.

निष्कर्ष: इलेक्ट्रॉन केवळ एक बिंदू नसून तो एका जागेत तरंगासारखा पसरलेला असतो.

Certainty vs. Probability | निश्चितता विरुद्ध संभाव्यता

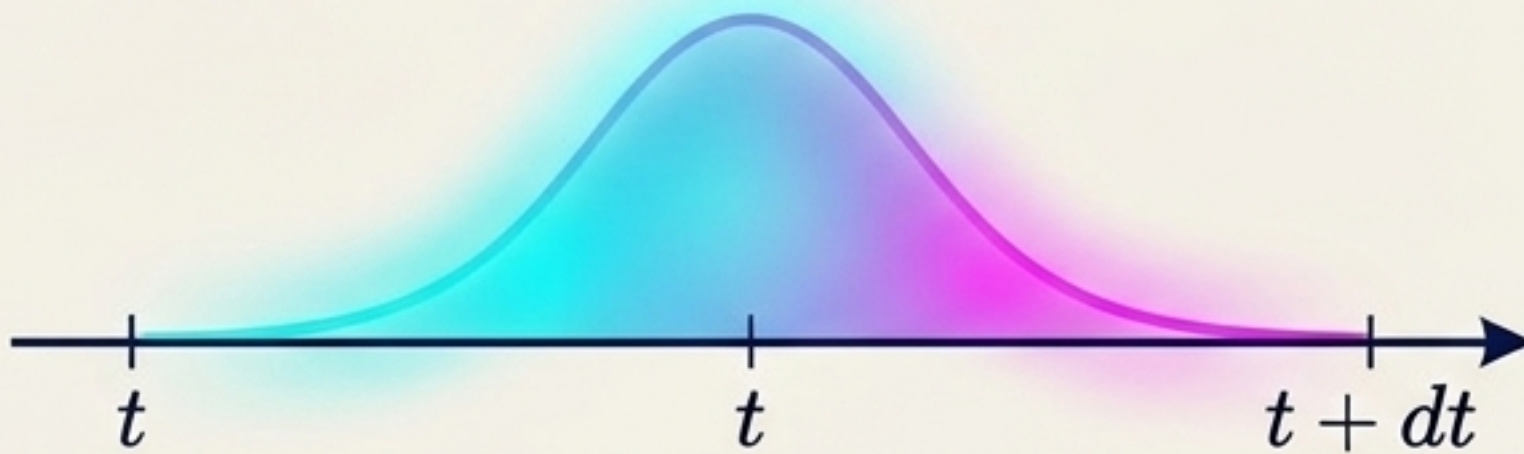
Classical Physics



निश्चितता (Certainty)

- जेव्हा आपण इलेक्ट्रॉनला कण मानतो, तेव्हा आपण त्याची अचूक जागा (Location) सांगू शकतो.

Quantum Physics



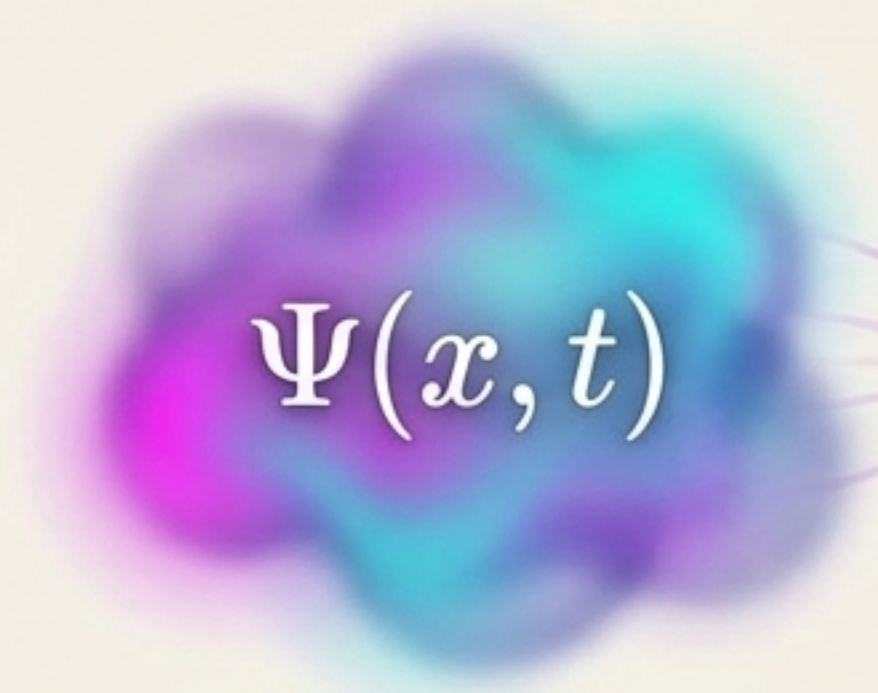
संभाव्यता (Probability)

- जेव्हा आपण त्याला तरंग मानतो, तेव्हा तो एका विशिष्ट बिंदूवर नसून एका विशिष्ट अंतरात पसरलेला असतो.
- अचूक जागा सांगणे अशक्य आहे. आपण केवळ इलेक्ट्रॉन विशिष्ट जागेत मिळण्याची संभाव्यता सांगू शकतो.

क्वांटम मेकॅनिक्स हे सांख्यिकीय यंत्रशास्त्र (Statistical Mechanics) आणि संभाव्यतेच्या भाषेवर आधारित आहे.

Wave Function & Probability Density | तरंग कार्य आणि संभाव्यता घनता

Step 1: Abstract



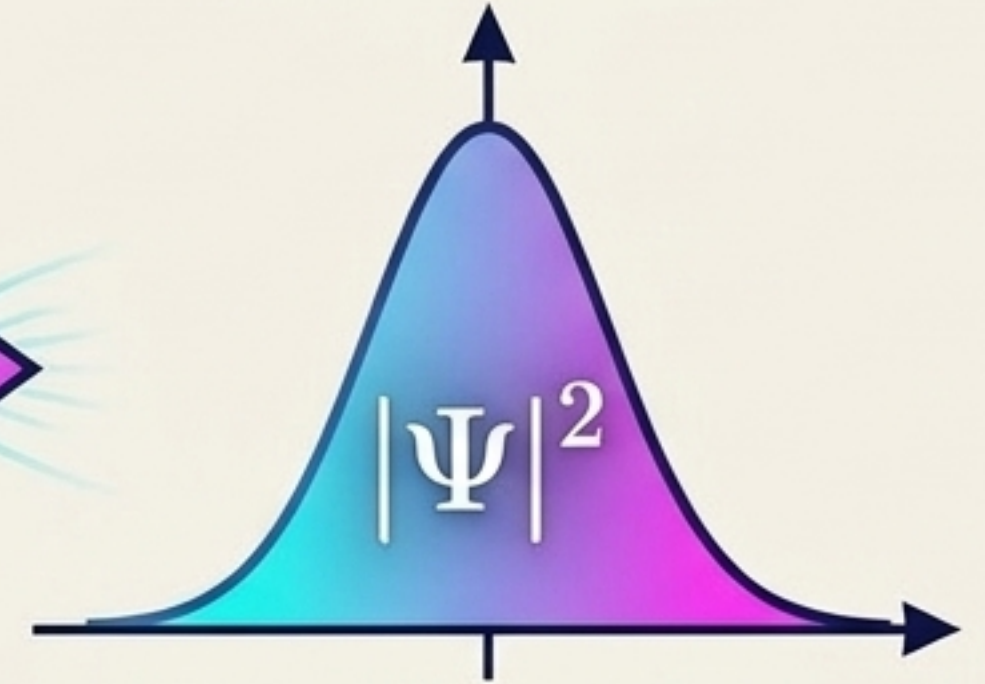
$$\Psi(x, t)$$

Step 2: The Operator



Multiply
by Ψ^*

Step 3: Reality



$$|\Psi|^2$$

वेव फंक्शन (Ψ):

कणाची स्थिती दर्शवते, परंतु ही एक गुंतागुंतीची (Complex) संख्या आहे जी भौतिक जगात मोजता येत नाही.

कॉम्प्लेक्स कॉन्जुगेट (Ψ^*):

उदाहरणार्थ, जर $z = a + ib$ असेल, तर कॉन्जुगेट $z^* = a - ib$ असतो.

संभाव्यता घनता ($|\Psi|^2$):

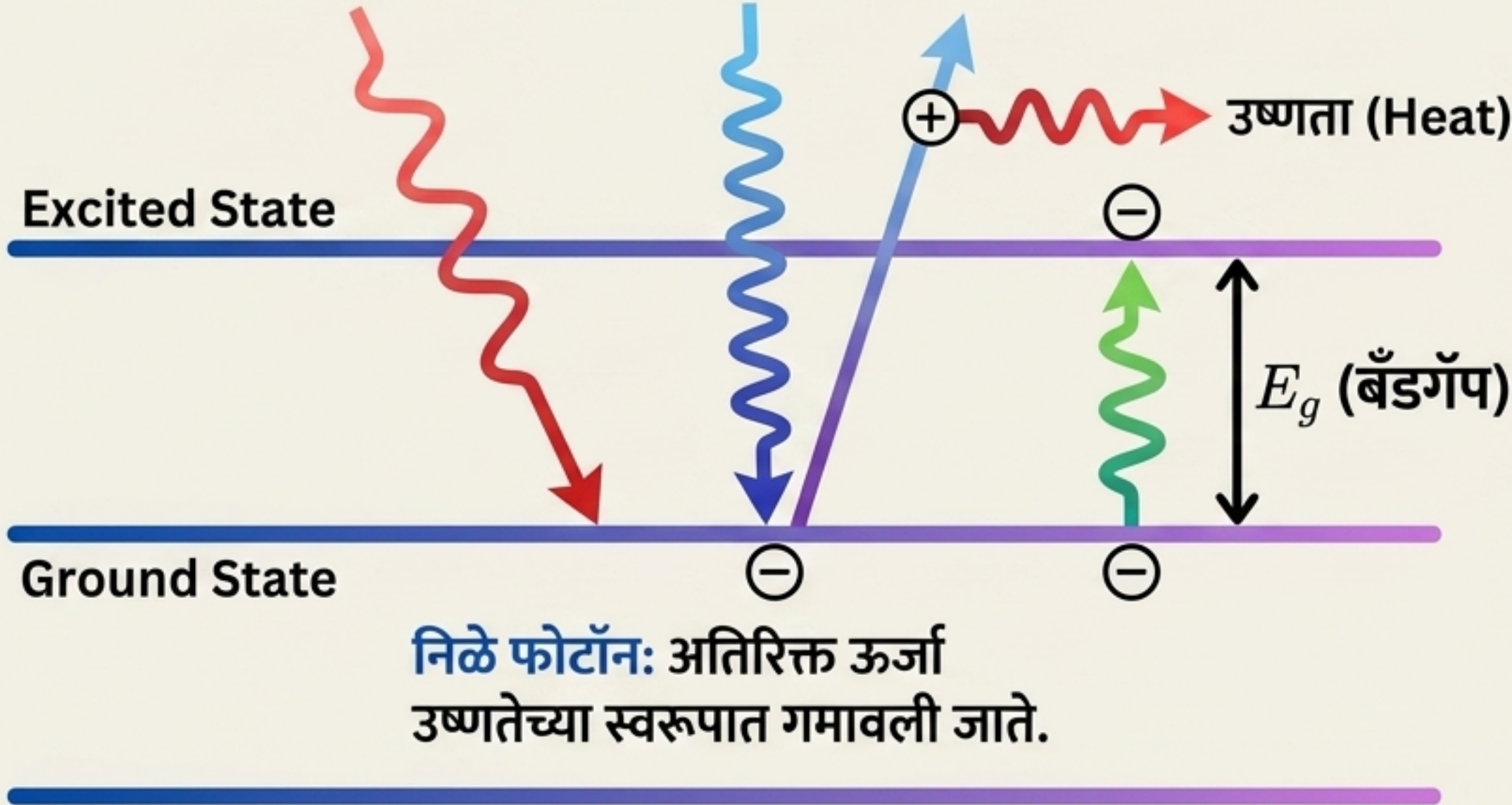
या गुणाकारामुळे आपल्याला वास्तव संख्या मिळते. हे इलेक्ट्रॉन अचूक कुठे सापडेल याची सर्वाधिक शक्यता दर्शवते.

The Solar Spectrum and Efficiency | सौर स्पेक्ट्रम आणि कार्यक्षमता

The Photovoltaic Bandgap Model

लाल फोटॉन: ऊर्जा कमी, शोषले जात नाहीत (वाया जातात).

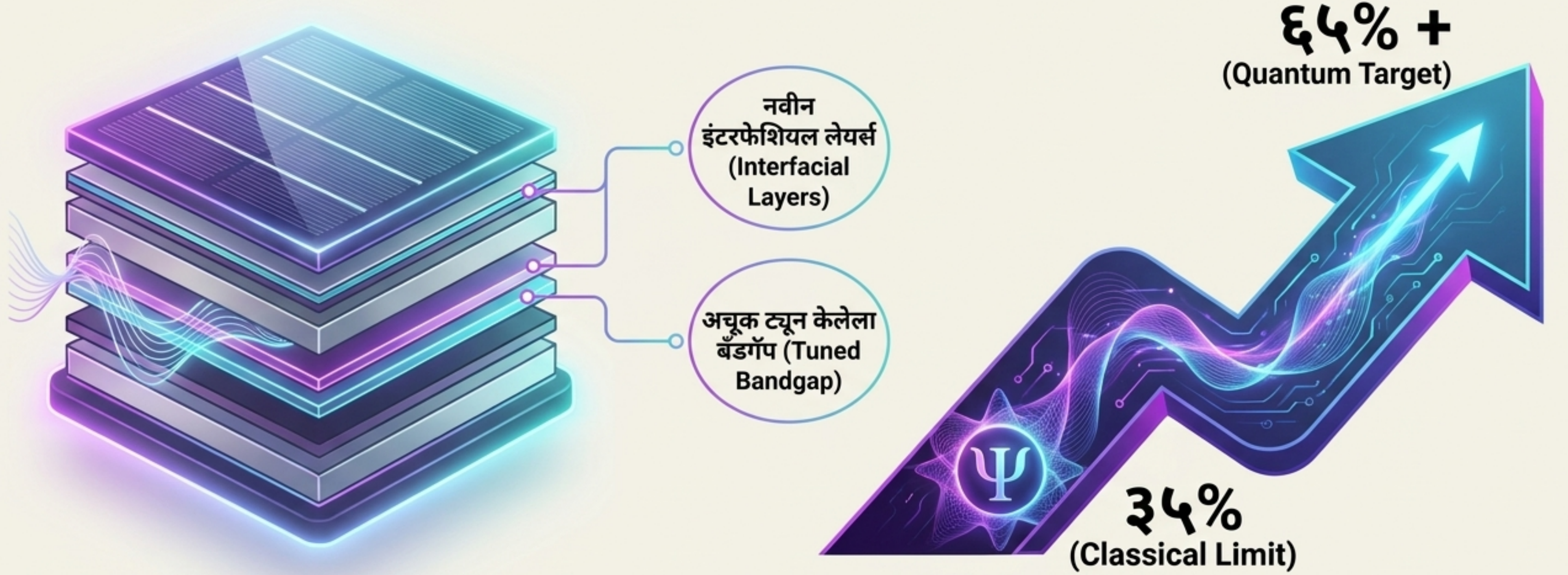
निळे फोटॉन: अतिरिक्त ऊर्जा उष्णतेच्या स्वरूपात गमावली जाते.



कार्यक्षमता मर्यादा

- जेव्हा फोटॉन सोलर सेलवर पडतात, तेव्हा इलेक्ट्रॉन एक्सायटेड स्टेटमध्ये जातो.
- कमी आणि जास्त ऊर्जेच्या फोटॉन्समुळे होणाऱ्या नुकसानीमुळे पारंपारिक सोलर सेलची उपयुक्त कार्यक्षमता केवळ ३० ते ३५% इतकीच मर्यादित राहते.

Tuning the Bandgap via QM | उच्च कार्यक्षमतेसाठी बँडगॅप ट्यूनिंग



- आपले अंतिम उद्दिष्ट सोलर सेलची कार्यक्षमता ६६% किंवा त्याहून अधिक वाढवणे हे आहे.
- हे साध्य करण्यासाठी आपल्याला सोलर सेलचा संपूर्ण सूर्यप्रकाश स्पेक्ट्रम शोषून घ्यावा लागेल.
- बँडगॅप अचूकपणे ट्यून करण्यासाठी नवीन लेयर्समधील इलेक्ट्रॉनचे वर्तन समजून घेणे गरजेचे आहे.
- इलेक्ट्रॉन आणि अणूंच्या या पातळीवरील बदलांचे नियंत्रण केवळ क्वांटम मेकॅनिक्सच्या साहाय्यानेच शक्य आहे.

Intro to the Schrödinger Equation | श्रोडिंजर समीकरणाचा परिचय



$$F = ma$$

- पारंपारिक भौतिकशास्त्रात कणाची गती आणि स्थान शोधण्यासाठी न्यूटनचे सूत्र वापरले जाते.
- हे सूत्र क्वांटम कणांसाठी (उदा. नॅनो खडू किंवा इलेक्ट्रॉन) चालत नाही.



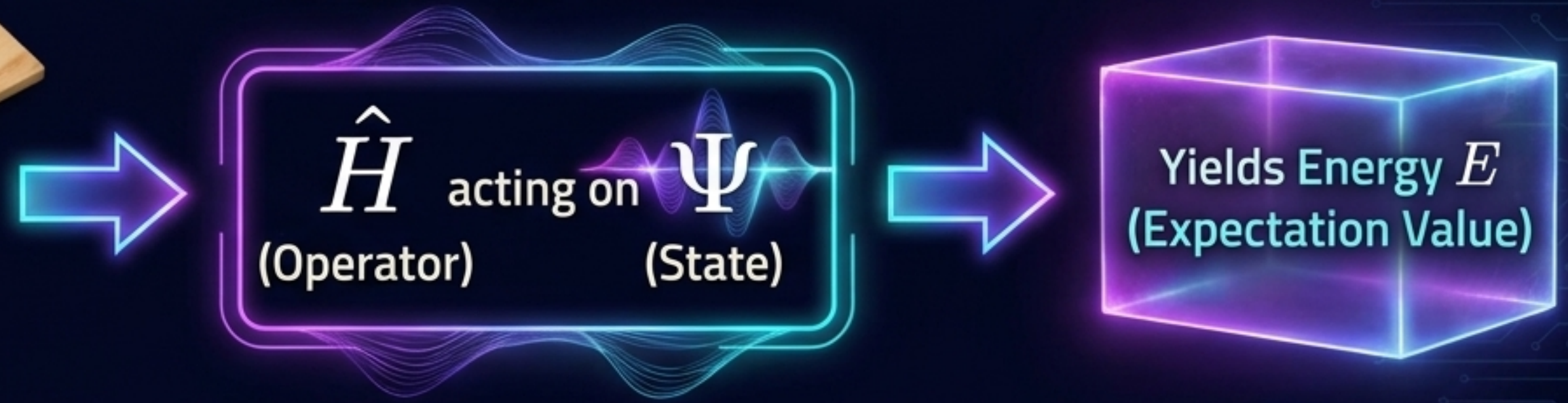
$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

- क्वांटम कणांच्या वेव फंक्शनचे (Ψ) वेळेनुसार कसे परिवर्तन होते, हे दर्शवणारे सूत्र एर्विन श्रोडिंजर यांनी १९२५ मध्ये शोधले.
- श्रोडिंजर समीकरण हे क्वांटम मेकॅनिक्सचा गाभा आहे, ज्यामुळे वेव-पार्टिकल ड्युएलिटी गणितीय स्वरूपात सोडवता येते.

या अतुलनीय शोधासाठी श्रोडिंजर यांना १९३३ मध्ये भौतिकशास्त्रातील नोबेल पारितोषिक मिळाले. हे समीकरण आपल्याला अणू पातळीवरील भौतिक प्रणालींच्या गतिशास्त्राचा अभ्यास करण्यास मदत करते.



Measurement Translation



ऑपरेटरची गरज

पारंपारिक जगात आपण मोजपट्टी वापरतो. क्वांटम जगात इलेक्ट्रॉनची जागा मोजण्यासाठी कोणतीही भौतिक मोजपट्टी नाही. मोजता येणाऱ्या प्रत्येक प्रमाणासाठी एक 'ऑपरेटर' असतो.

मोजमापाचा निकाल

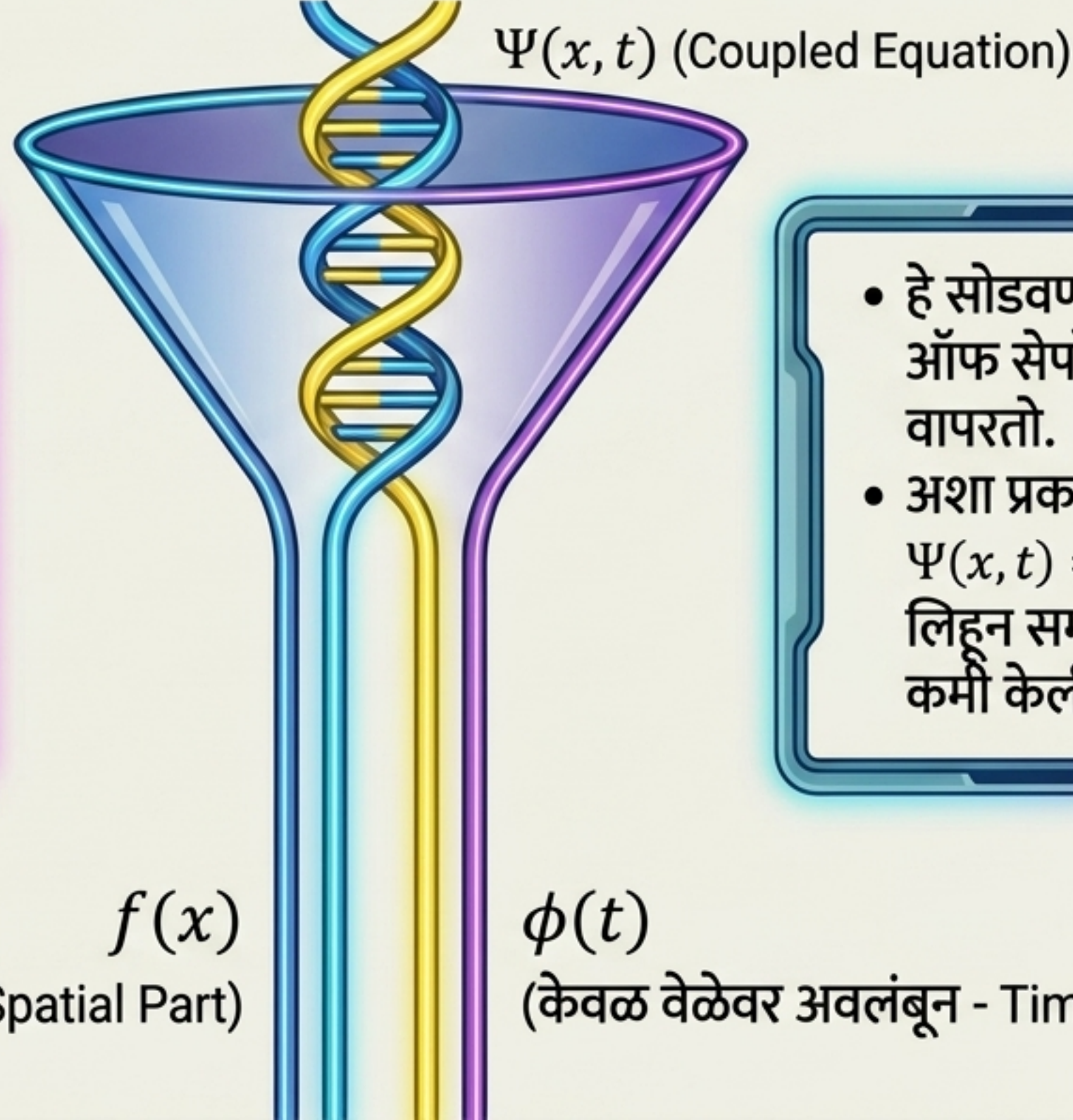
जेव्हा ऑपरेटर वेव फंक्शनवर कार्य करतो, तेव्हा आपल्याला निकाल मिळतो. क्वांटम जगात प्रत्येक वेळी मोजमाप केल्यावर प्रणाली बदलते, त्यामुळे अनेक मोजमापांची सरासरी काढावी लागते.

हॅमिल्टोनियन ($\hat{H}$)

मोजमापाच्या सरासरी मूल्याला 'एक्स्पेक्टेड वॅल्यू' म्हणतात. संपूर्ण प्रणालीची गतीज आणि संभाव्य ऊर्जा दर्शवणाऱ्या ऑपरेटरला हॅमिल्टोनियन ($\hat{H}$) म्हणतात.

Separation of Variables (Part 1) | व्हेरिएबल्स वेगळे करण्याची पद्धत

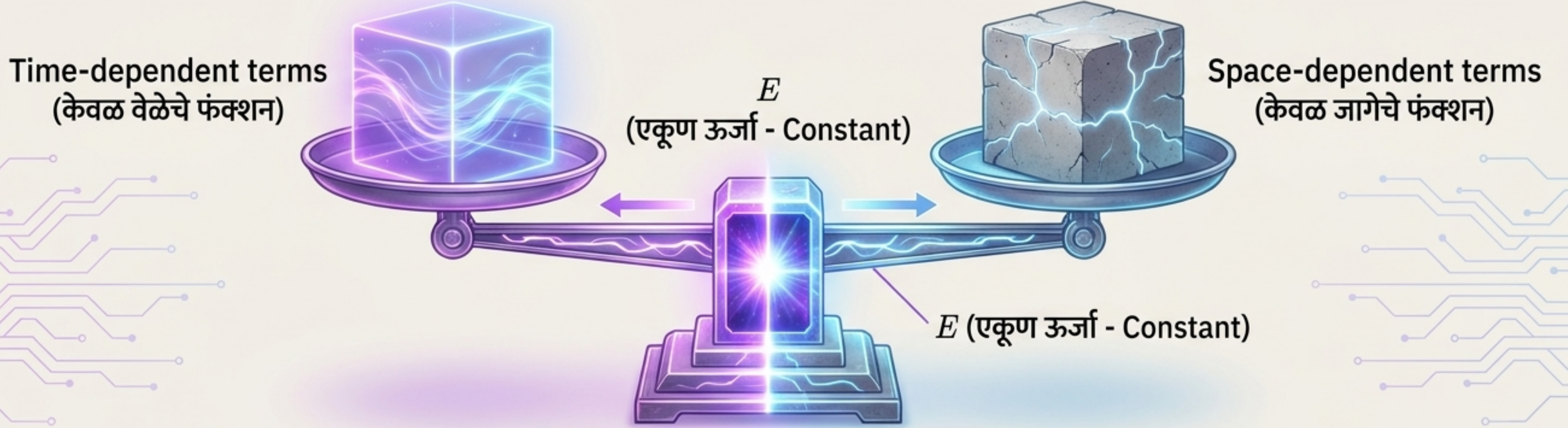
Funnel Diagram



- १-D श्रोडिंजर समीकरण जागा (x) आणि वेळ (t) या दोन्हीवर अवलंबून असते.
- हे एक 'कपल्ड' (Coupled) समीकरण आहे, जे थेट सोडवणे व्यावहारिकदृष्ट्या अत्यंत कठीण असते.

- हे सोडवण्यासाठी आपण 'मेथड ऑफ सेपरेशन ऑफ व्हेरिएबल्स' वापरतो.
- अशा प्रकारे, $\Psi(x, t) = f(x) \times \phi(t)$ असे लिहून समीकरणाची गुंतागुंत कमी केली जाते.

Splitting Space and Time | जागा (Space) आणि वेळ (Time) वेगळे करणे



Step 1: अवकलन

श्रोडिंजर समीकरणाचे जागेच्या आणि वेळेच्या संदर्भात आंशिक अवकलन (Partial Differentiation) केले जाते. समीकरणाला $f \times \phi$ ने भागले जाते.

Step 2: विभाजन

यामुळे डावी बाजू केवळ वेळेचे फंक्शन बनते आणि उजवी बाजू केवळ जागेचे फंक्शन बनते.

Step 3: स्थिर मूल्य

हे दोन भिन्न भाग एकाच वेळी तेव्हाच समान असू शकतात जेव्हा ते एका स्थिर मूल्याच्या (Constant) बरोबरीचे असतील. याला आपण कणाची एकूण ऊर्जा (E) मानतो.

Time-Independent Schrödinger Equation | वेळ-स्वतंत्र श्रोडिंजर समीकरण



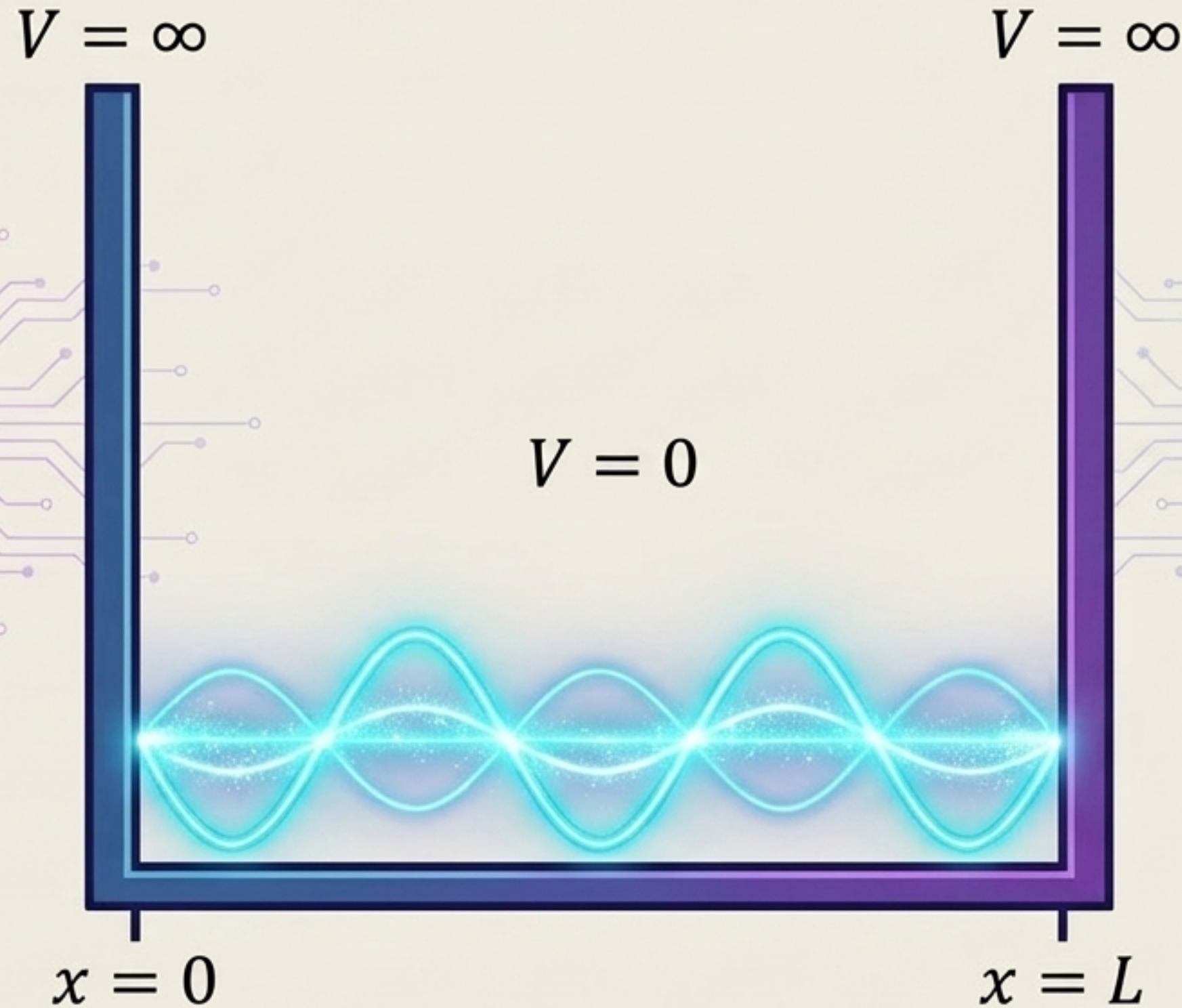
$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

(Time-Independent Equation)



- वेळेचा भाग वेगळा केल्यानंतर, आपल्याकडे केवळ जागेवर (Position) आणि पोटेन्शियल (V) वर अवलंबून असणारे समीकरण उरते.
- यामध्ये वेळेचा (t) कोणताही उल्लेख नसतो. यालाच वेळ-स्वतंत्र श्रोडिंजर समीकरण म्हणतात.
- धातू किंवा सेमीकंडक्टरमधील इलेक्ट्रॉनचा अभ्यास करण्यासाठी याच समीकरणाचा सर्वाधिक वापर होतो.
- सोलर सेलच्या बँडगॅप डिझाईनमध्ये विविध पोटेन्शियलसाठी (V) हेच समीकरण सोडवले जाते.

Practical: Particle in a 1D Box | प्रॅक्टिकल: १-D बॉक्समधील कण



१-D बॉक्स मॉडेल

समजा एक इलेक्ट्रॉन एका L लांबीच्या आयताकृती बॉक्समध्ये बंदिस्त आहे. बॉक्सच्या आत पोटेन्शियल ऊर्जा शून्य आहे, म्हणजेच तो मुक्तपणे फिरू शकतो.

सीमारेषा (Boundary Conditions)

बॉक्सच्या भिंतींवर आणि बाहेर पोटेन्शियल अनंत ($V = \infty$) आहे, ज्यामुळे कण बाहेर जाऊ शकत नाही. आपण $x = 0$ ते $x = L$ या सीमारेषा वापरून समीकरण सोडवतो.

परिणाम (Quantization)

यातून सिद्ध होते की बॉक्समधील कणाची ऊर्जा सक्कल सलग नसून ती ठराविक (Quantized - E_n) असते.

Summary and Questions | सारांश आणि सराव प्रश्न

सारांश (Summary)

- आपण खडूच्या (Macro) उदाहरणापासून क्वांटम (Micro) जगापर्यंतचा प्रवास केला.
- प्रकाश आणि मॅटर दोन्ही वेव्ह-पार्टिकल ड्युएलिटी दर्शवतात आणि क्वांटम जग संभाव्यतेवर चालते.
- सोलर सेलची कार्यक्षमता वाढवण्यासाठी बँडगॅप ट्युनिंग आणि श्रोडिंजर समीकरणाचे ज्ञान अत्यावश्यक आहे.

चर्चा प्रश्न (Discussion Questions)

- १: नॅनो पातळीवर न्यूटनचे नियम का अपयशी ठरतात?
- २: पारंपारिक सोलर सेल ३५% पेक्षा जास्त कार्यक्षम का नसतात?
- ३: Ψ आणि $|\Psi|^2$ मध्ये भौतिक दृष्ट्या काय फरक आहे?
- ४: श्रोडिंजर समीकरणामध्ये स्पेस आणि टाईम वेगळे का करावे लागतात?

सराव प्रश्न (Practice Questions)

- १: जर इलेक्ट्रॉनचा वेग v आणि वस्तुमान m दिले असेल, तर डी ब्रॉग्ली तरंगलांबी (λ) काढा.
- २: १-D बॉक्स ($V = 0$) साठी श्रोडिंजर समीकरण लिहा आणि सीमारेषा (Boundary Conditions) स्पष्ट करा.

