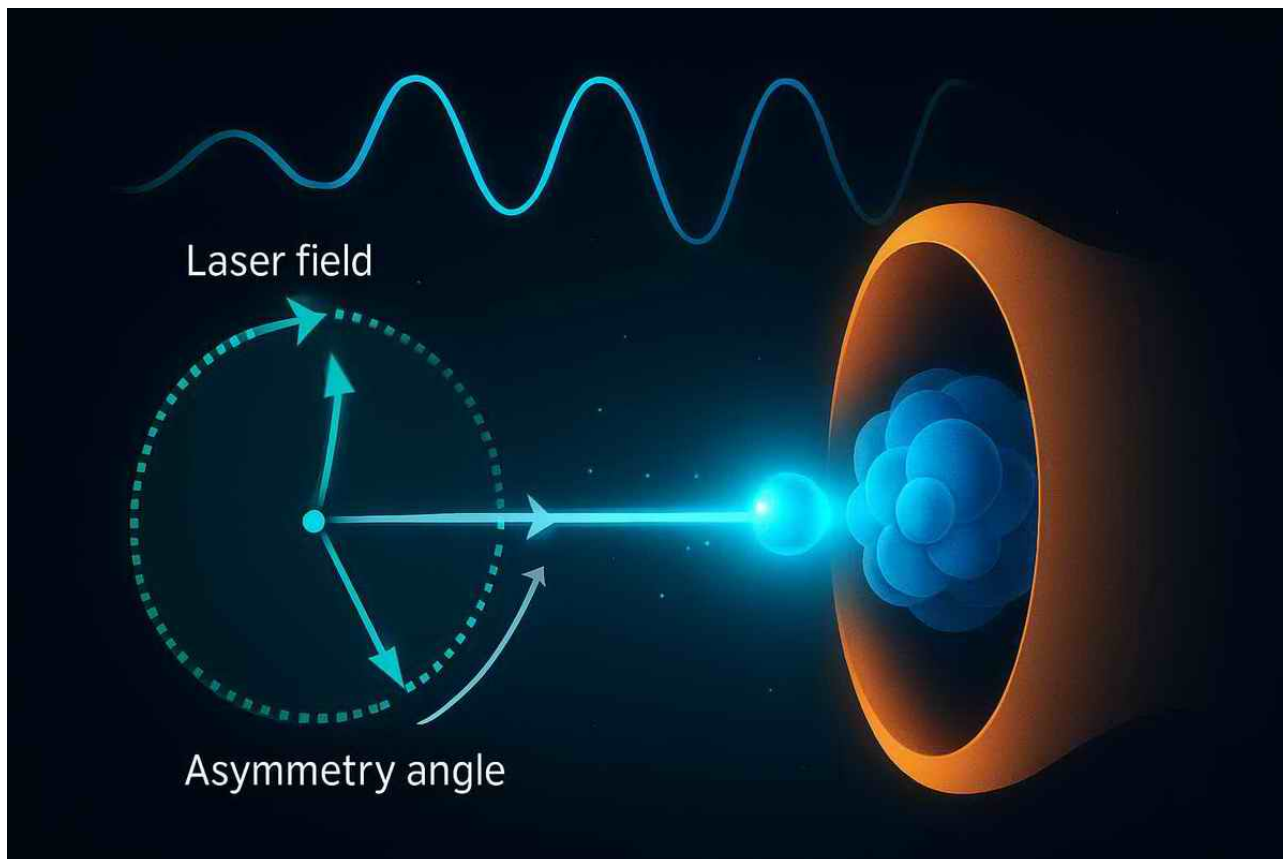


Фазово-разрешённый аттоклок: как учёные научились измерять исчезающе малое время квантового туннелирования электронов



Дата публикации: 07.06.2025

Квантовое туннелирование — один из самых загадочных и фундаментальных эффектов квантовой механики, при котором частица, такая как электрон, преодолевает энергетический барьер, невозможный с точки зрения классической физики. Несмотря на десятилетия исследований, один из важнейших вопросов оставался без чёткого ответа: сколько времени электрон проводит внутри потенциального барьера во время туннелирования?

Для решения этой задачи физики создали уникальный класс инструментов — аттоклоки. Эти устройства способны фиксировать события с временным разрешением в аттосекундном масштабе (10^{-18} секунды), что делает их идеальными кандидатами для изучения ультрабыстрой **электронной** динамики. Однако предыдущие версии аттоклоков, основанные на эллиптически поляризованном лазерном свете, страдали от систематических ограничений, включая сложные модели интерпретации и нестабильность результатов.

Новая работа, опубликованная в журнале *Physical Review Letters*, представляет значительный шаг вперёд. Команда учёных из Университета Уэйна и Университета Сорбонны предложила усовершенствованную версию — фазово-разрешённый аттоклик. Он использует ключевой параметр, известный как фаза огибающей несущей (CER), — разницу между максимумом амплитуды лазерного импульса и пиком его колебательного поля. Именно эта особенность позволила точно зафиксировать момент, когда электрон покидает атом, преодолевая туннельный барьер.

Новое устройство не только минимизирует неопределённости, присущие предыдущим моделям, но и подавляет влияния фоновых эффектов, не зависящих от времени, которые мешали интерпретации. Сравнение данных, полученных при круговой и эллиптической поляризации света, позволило достоверно зафиксировать фазу, в которой происходит туннелирование, и установить, что само время нахождения электрона в барьере стремится к нулю.

Важный вывод состоит в том, что углы отклонения электронов после туннелирования зависят преимущественно от ионизационного потенциала атома, а не от задержек туннелирования. Это открытие кардинально меняет наши представления о характере этих процессов и устраняет одну из ключевых неопределённостей в квантовой динамике.

Учёные также предполагают, что обнаруженные временные задержки хоть и малы, но всё же ненулевые — на грани современных возможностей измерения. Это означает, что в ближайшем будущем потребуется создать ещё более чувствительный инструмент — так называемый «зептоклик», способный регистрировать события с точностью до зептосекунды (10^{-21} секунды).

Разработка фазово-разрешённого аттоклика открывает не только фундаментальные горизонты для квантовой физики, но и новые перспективы в прикладных науках. В частности, исследовательская группа уже работает над превращением этой методики в [спектроскопический](#) инструмент, позволяющий в реальном времени отслеживать химические реакции на уровне отдельных электронов. Это может стать прорывом в фемто- и аттосекундной химии, где наблюдение переходных состояний молекул даёт ключ к пониманию процессов катализ, фотохимии и даже биохимических взаимодействий.

Таким образом, новый фазово-разрешённый аттоклик стал не просто очередным экспериментальным устройством, а мощным инструментом в арсенале современной науки, приближающим нас к полному пониманию субатомного мира.

Ссылка: «Эммануэль Орунесаджо и др., Phase-Resolved Attoclock, Physical Review Letters (2025)» [DOI: 10.1103/PhysRevLett.134.203201](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.203201).