

эффекте, узкие спектральные линии испускаются квантовыми генераторами — мазерами и лазерами.

Лит.: Konjevic N., Dimitrijevic M. S., Wiese W. L., Experimental Stark widths and shifts for spectral lines of neutral atoms, «J. Phys. Chem. Ref. Data», 1984, v. 13, № 3, p. 619; Konjevic N., Dimitrijevic M. S., Experimental Stark widths and shifts for spectral lines of positive ions, там же, p. 649; см. также лит. при ст. *Уширение спектральных линий*.
Е. А. Юков.

ШИРИНА УРОВНЯ — неопределённость энергии квантовомеханич. системы (атома, молекулы и др.), обладающей дискретными уровнями энергии ϵ_k в состоянии, к-рое не является строго стационарным. Ш.у. $\Delta\epsilon_k$, характеризующая размытие уровня энергии, его уширение, зависит от ср. длительности пребывания системы в данном состоянии — времени жизни на уровне τ_k и, согласно *неопределённости соотношению* для энергии и времени, $\Delta\epsilon_k \approx \hbar/\tau_k$. Для строго стационарного состояния системы $\tau_k = \infty$ и $\Delta\epsilon_k = 0$. Время жизни τ_k , а следовательно, и Ш.у. обусловлены возможностью *квантовых переходов* системы в состоянии с др. энергиями. Для свободной системы (напр., для изолир. атома) спонтанные излучат. переходы с уровня ϵ_k на нижележащие уровни ϵ_i ($\epsilon_i < \epsilon_k$) определяют радиационную, или естественную, Ш.у.:

$(\Delta\epsilon)_{\text{рад}} \approx \hbar A_k$, где $A_k = \sum A_{ki}$ — полная вероятность спонтанного испускания с уровня ϵ_k , A_{ki} — *Эйнштейна коэффициенты* для спонтанного испускания.

Уширение уровня может быть вызвано также спонтанными безызлучат. переходами, напр. для радиоакт. атомного ядра — *альфа-распадом*. Ширина атомного уровня очень мала по сравнению с энергией уровня. В др. случаях (напр., для возбуждённых ядер, вероятность квантовых переходов к-рых обусловлена испусканием нейтронов и очень велика) Ш.у. может стать сравнимой с расстоянием между уровнями. Любые взаимодействия, увеличивающие вероятность перехода системы в др. состояния, приводят к дополнит. уширению уровней. Примером может служить уширение уровней атома (иона) в плазме в результате его столкновения с ионами и электронами (см. *Излучение плазмы*). В общем случае полная Ш.у. пропорц. сумме вероятностей всех возможных переходов с этого уровня — спонтанных и вызванных разл. взаимодействиями.

Лит. см. при ст. *Ширина спектральной линии*. М. А. Ельшицев.

ШИРОКИЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЛЬВНИ — потоки *лептонов* (электронов, мюонов) и *адронов*, возникающие в атмосфере в результате взаимодействия первичных космич. частиц сверхвысокой энергии ($\epsilon_0 > 10^5$ ГэВ) с ядрами атомов воздуха. Поперечные размеры Ш.а.л. достигают неск. км. Ш.а.л. обнаруживаются и изучаются с помощью систем *детекторов* частиц, расположенных в горизонтальной плоскости и включённых в схему совпадений (см. *Совпадений метод*). Развита также методы регистрации черенковского и ионизат. свечения атмосферы под воздействием Ш.а.л. и радиоизлучения Ш.а.л. Ливни впервые обнаружены П. Оже (P. Auger) и Р. Маза (R. Maze) в 1938 с помощью системы газоразрядных детекторов, расположенных на одной плоскости на расстояниях ~ 100 м друг от друга. В 1949 на Памире были зарегистрированы Ш.а.л. при раздвижении детекторов до 1 км.

Источником Ш.а.л. являются *электронно-ядерные ливни*, порождаемые космич. протонами и более тяжёлыми ядрами с последующим развитием электронно-фотонного и ядерного каскадов в атмосфере. Углы вылета частиц в первом акте взаимодействия адрона, вызывающего Ш.а.л., малы: $\theta \leq 10^{-5}$ рад. Поэтому развитие каскада происходит по направлению движения первичной частицы и Ш.а.л. имеет осевую симметрию относительно этого направления (небольшие отклонения от осевой симметрии могут возникать под влиянием магн. поля Земли). Плотность частиц максимальна около оси и уменьшается с расстоянием. С расстоянием от оси меняется и состав частиц в ливне. Вблизи оси 98% всех частиц составляют электро-

ны (и фотоны) с небольшой примесью адронов высокой энергии. На расстояниях ~ 200 м электроны составляют лишь 80% потока, а остальные 20% — мюоны, к-рые появляются в ливне из-за распада заряж. пионов и каонов. Возникнув на больших высотах, где атмосфера разрежена, мюоны слабо поглощаются при дальнейшем движении к поверхности Земли и успевают до уровня наблюдения отойти на значит. расстояние от оси ливня.

Ш.а.л. можно представить в виде тонкого диска, состоящего из частиц, движущихся со скоростью, близкой к c , по направлению первичной частицы (рис. 1). В центре толщи-

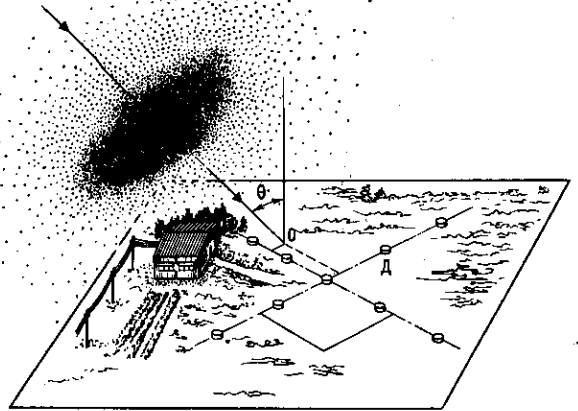


Рис. 1. Диск, образованный частицами широкого атмосферного ливня, приближается к установке под углом θ ; Д — детекторы.

на диска минимальна ($\sim 1,5$ м), а на больших расстояниях увеличивается и на расстоянии 100 м от оси может достигать 50 м. В переднем фронте диска движется электроны, частицы большей массы запаздывают и населяют «хвост» Ш.а.л. Фронт диска имеет кривизну, радиус к-рой на расстоянии ≥ 200 м от оси $\sim 1,5$ км.

В электронно-ядерном ливне, генерированном первичной космич. частицей, часть её энергии передаётся нейтральным *пи-мезонам* π^0 . Распадаясь, они дают начало электронно-фотонному каскаду. Заряж. пионы после распада образуют мюоны и нейтрино, к-рые достигают поверхности Земли. Ок. половины энергии сохраняется у адрона высокой энергии, к-рый порождает следующий электронно-ядерный ливень. Этот процесс повторяется многократно. В земной атмосфере укладывается до десятка пробегов ядерного взаимодействия λ (рис. 2). Совокупность электронно-фотонных каскадов, а также мюонов и др. частиц от всех последовательных взаимодействий и образует Ш.а.л.

Прямые данные о ядерном составе космич. лучей и характеристиках элементарного акта взаимодействия в области сверхвысоких энергий отсутствуют. Однако сравнение результатов расчёта с экспериментом позволяет сделать заключения об изменениях характеристик элементарного акта и ядерного состава космич. лучей с ростом энергии.

Ряд особенностей Ш.а.л. может быть понят на основе теории *электронно-фотонных ливней*. Напр., поперечный размер электронной компоненты Ш.а.л. определяется кулоновским рассеянием электронов и, следовательно, его среднеквадратичный радиус $\sqrt{\langle R^2 \rangle} = 0,9 r_0$, где r_0 — мольтерский радиус, $r_0 = 9,5$ г/см² (70 м на уровне моря). Среднеквадратичный радиус Ш.а.л., выраженный в единицах r_0 , не зависит от высоты (радиус, выраженный в метрах, уменьшается с глубиной в атмосфере). Величина $\sqrt{\langle R^2 \rangle}$ не зависит и от энергии первичной частицы, вызвавшей ливень, но реальный размер ливня, т. е. расстояние от оси, на к-ром ещё существуют коррелированные части-