

ком диапазоне масштабов от субъядерных до космологических. Физ. и методологич. смысл П. п. тесно связан с философским понятием причинности (взаимной обусловленности, детерминированности последовательности событий); если бы данное событие могло влиять не только на будущее, но и на прошлое, то возникла бы возможность образования замкнутых циклов причинно-следств. связи, т. е. возможность обратного влияния следствия на породившую его причину вплоть до полного её уничтожения и разрыва причинно-следств. связи (так, путешественник в «машине времени» мог бы уничтожить своего предка в детском возрасте, т. е. саму причину своего появления на свет). Однако с общим понятием причинности согласуется и П. п. с обратным направлением причинно-следств. связи («прошлое не влияет на будущее»). Вопрос о причине совпадения направления этой связи с направлением времени относится к числу нерешённых проблем, связанных с П. п.

Объектом приложения П. п. служит относящаяся к данной физ. системе пара событий, причинно связанных друг с другом (а не являющихся следствиями третьего события), о к-рых известно, какое из них играет роль причины, а какое — следствия (безотносительно к их временному порядку). Для выявления такой пары используется мысленный эксперимент, состоящий в наложении на систему малого возмущения и в регистрации соответствующей реакции системы. При этом событием-причиной служит исходное возмущение при obeyт. условии, что оно совершенно произвольно способно принимать любые наперёд заданные значения и не испытывает обратного влияния со стороны самой системы (примером может служить воздействие внешнего по отношению к системе заданного источника). Роль события-следствия играет реакция системы на такое возмущение, т. е. линейное изменение к.л. характеристики системы; ф-ция, осуществляющая такую линейную связь, наз. функцией отклика. Напр., применение П. п. к электродинамике материальной среды требует выбора в качестве события-причины — возмущения электр. индукции, совпадающей с полем внеш. источников, а в качестве события-следствия — соответствующего изменения напряжённости электр. поля (часто практикуемый обратный выбор неправилен, т. к. возмущение напряжённости поля включает в себя неконтролируемый вклад самой среды). Выбрав указанным способом пару причинно-связанных событий, можно переформулировать П. п. в виде условия исчезновения соответствующей ф-ции отклика при отрицат. временах, а для релятивистского П. п. — вне полости светового конуса, обращённой в будущее.

Применения П. п. в аппарате теоретич. физики многочисленны и разнообразны. Он служит средством выбора нач. условий к динамич. ур-ниям, обеспечивая однозначность их решения. Так, при решении *Максвелла уравнений* П. п. позволяет сделать выбор между опережающими и запаздывающими потенциалами в пользу последних. В *квантовой теории поля* (КТП) и *квантовой теории многих частиц* с помощью П. п. устанавливаются правила обхода особенностей *Грина функций*, что делает однозначной технику *Фейнмана диаграмм*.

Наиб. содержат. следствия П. п. относятся к теории ф-ций отклика физ. системы, фурье-компонента к-рых по времени зависит от частоты ω , рассматриваемой как комплексная переменная. Из П. п. прямо следует аналитичность ф-ций отклика как ф-ции частоты в верх. полуплоскости ω ($\text{Im} \omega > 0$). Отсюда вытекают *дисперсионные соотношения* для ф-ции отклика, связывающие её дисперсионные (зависимость от частоты) и абсорбтивные (поглощение) свойства. При этом запаздывание реакции системы относительно её возмущения приводит к соотношениям, подобным *Крамерса — Кронига соотношениям*, а релятивистский П. п. даёт более общие и ограничит. дисперсионные соотно-

шения, найденные М. А. Леонтовичем и связанные с общим представлением Йоста — Лемана — Дайсона для матричного элемента запаздывающего коммутатора.

Микроскопич. основу отклика физ. системы составляют последоват. элементарные акты рассеяния новой, осуществляющих её возмущение, на частицах системы. Поэтому П. п. эффективен и применительно к самому акту рассеяния. Дисперсионные соотношения для рассеяния играют существ. роль в ядерной физике низких и высоких энергий. Особенно они важны для рассеяния сильно взаимодействующих частиц (адронов) — редкий пример точной зависимости между наблюдаемыми величинами (амплитудой упругого рассеяния вперёд и полным сечением (*Оптическая теорема*)), выведенной без использования к.л. модельных представлений об элементарных частицах (см. также *Дисперсионных соотношений метод*). Вывод дисперсионных соотношений относится к числу наиб. ярких достижений особого аксиоматич. подхода в теории фундам. взаимодействий, испытавшего бурное развитие в 1950—60-х гг., в рамках к-рого П. п. принадлежит конструктивная роль одного из главных (наряду с требованиями теории относительности и квантовой теории) постулатов, лежащих в основе этого подхода (см. *Аксиоматическая квантовая теория поля*).

Помимо перечисленных конкретных приложений П. п., в физике не раз возникало обострение интереса и к более общим проблемам, связанным с П. п. и понятием причинности. В период становления *квантовой механики* широко обсуждался вопрос, противоречит ли детерминизму вероятностное описание микроявлений. К разрешению этого вопроса привело понимание необходимости отказаться от прямолинейного детерминизма классич. механики при рассмотрении статистич. закономерностей микромира. Переход к адекватному описанию последних на языке волновых ф-ций приводит к тому, что и в квантовой механике нач. состояние системы полностью определяет (при заданных взаимодействиях) всю последующую её эволюцию.

В 50—60-х гг. трудности КТП стимулировали интерес к возможности нарушения П. п. в области сверхмалых масштабов пространства-времени. Такая возможность связана с тем, что под событием в формулировке П. п. понимается «точечное» событие, происходящее в данной точке пространства в данный момент времени; соответственно П. п., о к-ром до сих пор шла речь, наз. также принципом микроскопической причинности (см. *Микропричинность*). Между тем ограничения, вытекающие из квантовой теории и теории относительности, делают невозможной физ. реализацию точечного события: любое событие (т. е. любой акт взаимодействия частиц) имеет конечную протяжённость в пространстве и времени. Поэтому в области сверхмалых масштабов П. п. теряет своё непосредств. физ. содержание и становится формальным требованием. Это и позволяет говорить о возможности нарушения П. п. «в малом», разумеется, при сохранении его справедливости в больших масштабах пространства-времени. Такой «ослабленный» П. п. наз. принципом макроскопической причинности; его количественной формулировки, адекватно отражающей указанные выше ограничения, ещё нет. Этот принцип лежит в основе многочисл. попыток обобщения КТП, относящихся к *нелокальной квантовой теории поля*.

В кон. 60-х гг. стало общепризнанным, что частная (специальная) теория относительности сама по себе не запрещает движений со сверхсветовой скоростью, и началось подробное обсуждение свойств соответствующих объектов — т. н. *тахионов* (частиц с мнимой массой) и «супераука» (сверхсветовых фононов в сильно сжатой среде). Это стимулировало многочисл. попытки примирить сверхсветовой характер движения с выполнением П. п. и привело к более углублённому пониманию проблемы причинности, хотя сколько-нибудь полной ясно-